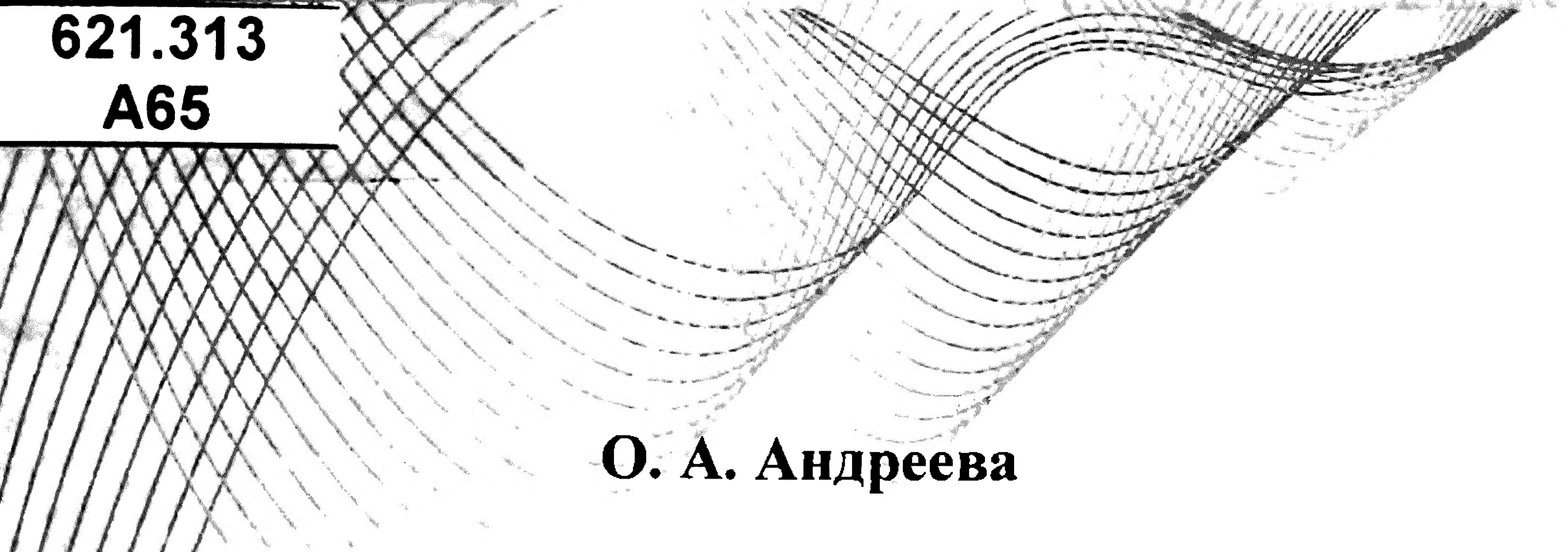


О. А. Андреева

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ



Павлодар

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Павлодарский государственный университет
им. С. Торайгырова

О. А. Андреева

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Монография

Павлодар
Кереку
2015

УДК 621.313.333:621.311(035.3)
ББК 31.261.63
А66

Рекомендовано к изданию Ученым советом Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова

Рецензенты:

К. И. Никитин – д-р техн. наук, проф. ОмГТУ;

К. В. Хацевский – д-р техн. наук, проф. Омского института водного транспорта;

А. Н. Новожилов – д-р техн. наук, проф. ПГУ им.С.Торайгырова

Андреева О. А.

А66 Разработка методов диагностики двигателей собственных нужд электрических станций : монография / О. А. Андреева. – Павлодар : Кереку, 2015. – 142 с.

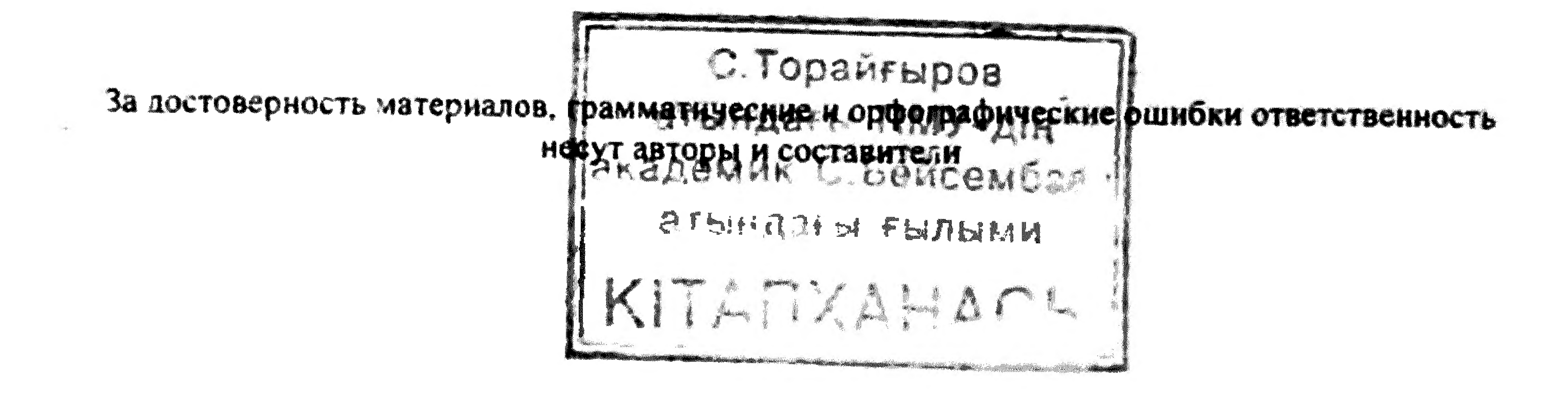
ISBN 978-601-238-514-4

В монографии изложены основы построения систем диагностики короткозамкнутого ротора асинхронных двигателей собственных нужд электрических станций на индукционных преобразователях. Предложены методы моделирования токов и магнитных полей. Разработаны конструкции и алгоритмы работы системы диагностики.

Монография рекомендуется студентам энергетических специальностей вузов.

УДК
621.313.333:621.311(035.3)
ББК 31.261.63

ISBN 978-601-238-514-4



Введение

На электрических станциях приводом основных механизмов собственных нужд (СН) являются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. По мнению различных авторов на их долю приходится до 25-35 % отказов всего электрического оборудования собственных нужд, из которых 4,7 – 10 % составляют повреждения короткозамкнутого ротора. В то же время экспериментальные исследования, проведенные на Павлодарских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-3, Экибастузской ГРЭС-1 и ГРЭС-2, а также Аксуской ГРЭС показали, что повреждаемость короткозамкнутого ротора АД значительно выше.

Ущерб от эксплуатации АД с поврежденным короткозамкнутым ротором выражается в основном в повышенном расходе электроэнергии. При этом стоимость перерасхода электроэнергии за год работы у такого АД нередко превышает стоимость самого двигателя.

Широко известные способы выявления повреждений короткозамкнутого ротора, которые основаны на внешнем осмотре и вибрации ферромагнитной пластины на поверхности частично выдвинутого ротора, можно использовать только при остановке и полной разборке АД. Однако, они не всегда позволяют выявить повреждение и использовать эти способы можно только в процессе ремонта двигателя при наличии высококвалифицированного специалиста.

Предложения по диагностированию короткозамкнутого ротора АД в процессе эксплуатации многочисленны. В одних из них предлагается диагностировать АД в специальных режимах, например, при пуске, пониженном напряжении и заторможенном роторе. В других - измерять пульсации тока статора, активной мощности и скольжения ротора двигателя. Однако эти методы не получили широкого применения из-за сложности, дороговизны и низкой эффективности.

В связи с изложенным, разработка методов диагностики обрыва стержней короткозамкнутого ротора АД является своевременной, а тема работы – актуальной.

Объектом исследования являются двигатели собственных нужд электрических станций. В качестве базового полигона исследований выбраны двигатели собственных нужд Павлодарской ТЭЦ-1.

Предметом исследования являются повреждения обмотки короткозамкнутого ротора АД.

Работа выполнялась в соответствии: с научными направлениями рабочей группы В4 «Релейная защита и автоматика» Международной конференции по большим энергетическим системам (СИГРЭ), с научной целевой комплексной темой «Замена традиционных трансформаторов тока и напряжения новыми датчиками тока и напряжения; влияние их на проектирование подстанций».

Идея работы заключается в выявлении с помощью точечных индукционных преобразователей (ТИП) из внешнего многополюсного магнитного поля АД магнитного поля с одной парой полюсов, что является характерным признаком наличия поврежденного стержня и позволяет осуществлять диагностику состояния короткозамкнутой обмотки ротора в произвольном режиме работы.

Целью работы является разработка простых и эффективных методов диагностики стержней короткозамкнутого ротора АД с помощью ТИП и персонального компьютера (ПК), которые позволят быстро и надежно выявлять это повреждение во время эксплуатации двигателя.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие основные задачи:

- построена математическая модель АД с короткозамкнутым ротором для расчета токов в его обмотках при обрыве стержней «беличьей клетки» ротора;

- разработан метод расчета трехмерных магнитных полей в торцевой зоне и на внешней поверхности подшипникового или торцевого щита АД с короткозамкнутым ротором при обрыве стержней его «беличьей клетки»;

- обоснован метод определения обрыва стержней короткозамкнутого ротора АД на базе новых информационных признаков;

- разработан алгоритм, позволяющий реализовать чувствительные и простые устройства диагностики повреждения короткозамкнутого ротора АД и определения минимума аппаратных средств, требуемых для их реализации.

Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования с использованием дифференциального исчисления и гармонического анализа, а также экспериментальные исследования. При моделировании режимов работы АД, их внешних магнитных полей, а также спектра этих полей использовались программы разработанные автором в Turbo Basic, Matlab и Delphi.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и

рекомендаций подтверждаются: использованием фундаментальных положений теоретических основ математики, электротехники, электрических машин и релейной защиты, методов математического моделирования токов и магнитных полей в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором. Достоверность полученных результатов и выводов подтверждена удовлетворительным совпадением результатов теоретических исследований и натурного эксперимента.

По результатам работы произведены производственные испытания системы диагностики на АД с короткозамкнутым ротором ТЭЦ-1 АО «Алюминий Казахстана» и цеха №2 Аксуского завода ферросплавов – филиала АО ТНК «Казхром».

1 Асинхронные двигатели и системы диагностики

1.1 Особенности конструкции индукционных преобразователей для релейной защиты и диагностики асинхронного двигателя

Одним из наиболее простых преобразователей электрической энергии в механическую [1] является АД с короткозамкнутым ротором, поэтому он является основой привода практически всего оборудования электрических станций. Значительная часть повреждений АД приходится на междуфазные и витковые замыкания, а также замыкания на землю и элементарных проводников обмотки статора. Анормальные режимы работы возникают при эксцентриситете ротора, его аксиальном перемещении и повреждении «беличьей клетки» или подшипников.

Традиционно для защиты АД от этих повреждений и анормальных режимов работы используются устройства [2–8] с первичными преобразователями в виде трансформаторов тока [2, 9]. В этом случае устройства защиты и диагностики получают информацию о повреждениях АД из токов в цепи обмотки статора. Для предотвращения ложной работы, их необходимо отстраивать от несимметрии АД и питающей сети. Из-за этого защиты имеют низкую чувствительность и срабатывают не в момент возникновения повреждения, а когда его размеры достигнут соответствующей величины. В этих условиях диагностика анормальных режимов двигателя вообще проблематична.

Более чувствительны к повреждениям и анормальным режимам работы защиты АД на первичных преобразователях [10–30], которые измеряют его магнитную несимметрию. Они, в силу конструкционных особенностей АД, нечувствительны к несимметрии питающей сети и позволяют сравнительно просто и дешево достичь высокой чувствительности. Таким образом, переход на новые виды первичных преобразователей при построении защит и систем диагностики становится актуальным. Вопрос о таком переходе настолько значителен, что в 2001 г специально рассматривался на 38 сессии СИГРЭ [31] в Париже на заседании посвященном теме «Замена традиционных трансформаторов тока и напряжения новыми датчиками тока и напряжения; влияние их на проектирование подстанций».

В обсуждаемых по этой теме докладах, были даны общие характеристики проблемы, рассмотрено влияние новых датчиков на другое оборудование систем релейной защиты и дана оценка

экономической целесообразности такой замены. При этом отмечалась высокая надежность работы новых систем, нечувствительность к помехам, низкое выходное напряжение и высокие экономические показатели. Стандартизация нетрадиционных датчиков позволит облегчить их интеграцию с современными цифровыми системами релейной защиты и диагностики.

Анализ видов и возможностей первичных преобразователей, измеряющих магнитную несимметрию АД, показывает, что для его защиты от повреждений и анормальных режимов работы наиболее эффективны индукционные преобразователи. Их можно размещать как на внешней поверхности, так и внутри АД. В результате, индукционные преобразователи и АД становятся единой конструкцией. В перспективе именно в таком виде двигатель должен изготавливаться на заводе. Примером может служить опытная партия двигателей 4АЗМ-8000-10000, которую выпустил завод «Элсиб» в г. Новосибирск для нефтепроводов западной Сибири.

Конструкция и место расположения индукционных преобразователей для внешней или внутренней установки зависят от их назначения, а также мощности, класса напряжения и конструкции защищаемого АД. На рисунке 1.1 приведены основные элементы конструкции АД с горизонтальным расположением вала и несколькими видами индукционных преобразователей, где 1 – корпус; 2 – магнитопровод статора; 3 – обмотка статора; 4 – магнитопровод ротора; 5 – обмотка ротора; 6 – вал ротора; 7 – внутренний вентилятор; 8 – внешняя система вентиляции; 9 – подшипники; 10 – подшипниковые щиты; 11 – бандажные кольца; 12 – вентиляционные каналы; 13 – **Ω**-образный преобразователь; 14 – преобразователь с ферромагнитным сердечником; 15 и 16 – корпус и обмотка кольцевого преобразователя; 17 и 18 – сердечник и обмотка П-образного преобразователя.

Как видно из рисунка 1.1, размещать индукционные преобразователи на внешней поверхности АД наиболее удобно у его торца, что не требует разборки машины. При этом все виды преобразователей можно условно подразделить на кольцевые (съемные и стационарные), обладающие также как и обмотки АД осевой симметрией, и точечные. На кольцевых преобразователях легко строить защиты обмотки статора от коротких замыканий. Точечные преобразователи в основном применяют для систем диагностики ротора и «беличьей клетки». При этом стационарные используют для защит, а съемные для систем диагностики. Рассмотрим основные виды индукционных преобразователей.

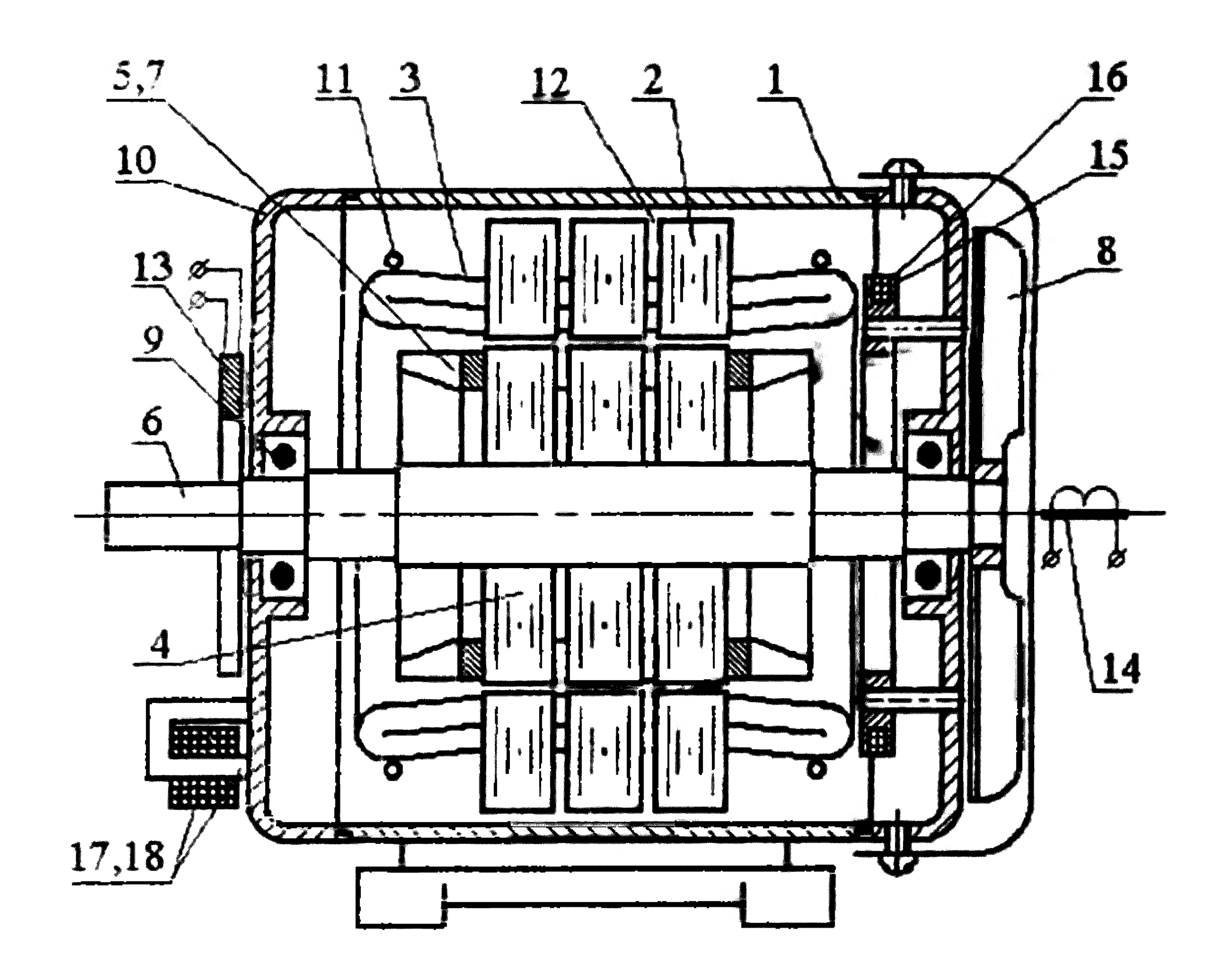


Рисунок 1.1 – Основные элементы конструкции литого АД с встроенными преобразователями

Для контроля качества обмотки ротора в заводских условиях при изготовлении АД предложено устройство [10]. Преобразователь такого типа стационарный. Его используют для выявления оборванных стержней в «беличьей клетке» ротора всех сходящих с конвейера АД. Он выполнен в виде контрольно-измерительной системы из многополюсных намагничивающих и двухполюсных измерительных обмоток. Контроль АД осуществляется в режиме холостого хода.

В устройстве [11] для измерения фазной несимметрии и защиты АД от нее предлагается использование преобразователя 14 с ферромагнитным сердечником, устанавливаемого на торце вала ротора. Его вариантом [12] является преобразователь 13 типа **Ω**. Оба преобразователя съемные. Их конструкция приведена на рисунке 1.2, где 1 – торец вала; 2 и 3 – сердечник и обмотка датчика; 4 – основание **Ω**-образного датчика; 5 и 6 – обмотка с выводами.

При построении системы диагностирования [13] «беличьей клетки» ротора АД использовался П – образный преобразователь, разработанный в ПГУ. Существует два варианта его использования: стационарный – для построения защиты АД (рисунок 1.3,а), съемный – служит основой для измерительного щупа (рисунок 1.3,б)

переносной системы диагностики на базе персонального компьютера типа Notebook или Penbook.

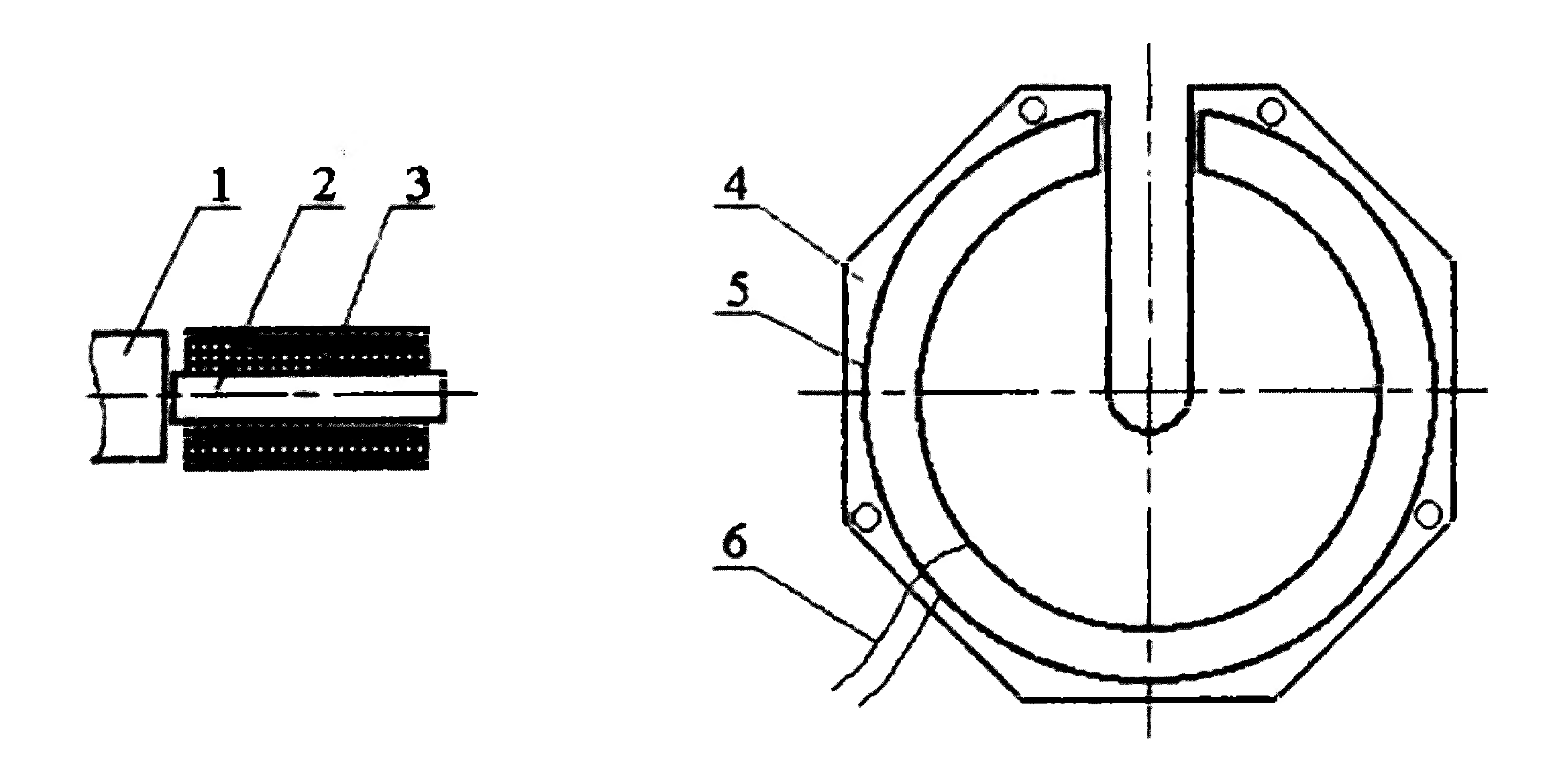


Рисунок 1.2 – Индукционные преобразователи для измерения фазной несимметрии

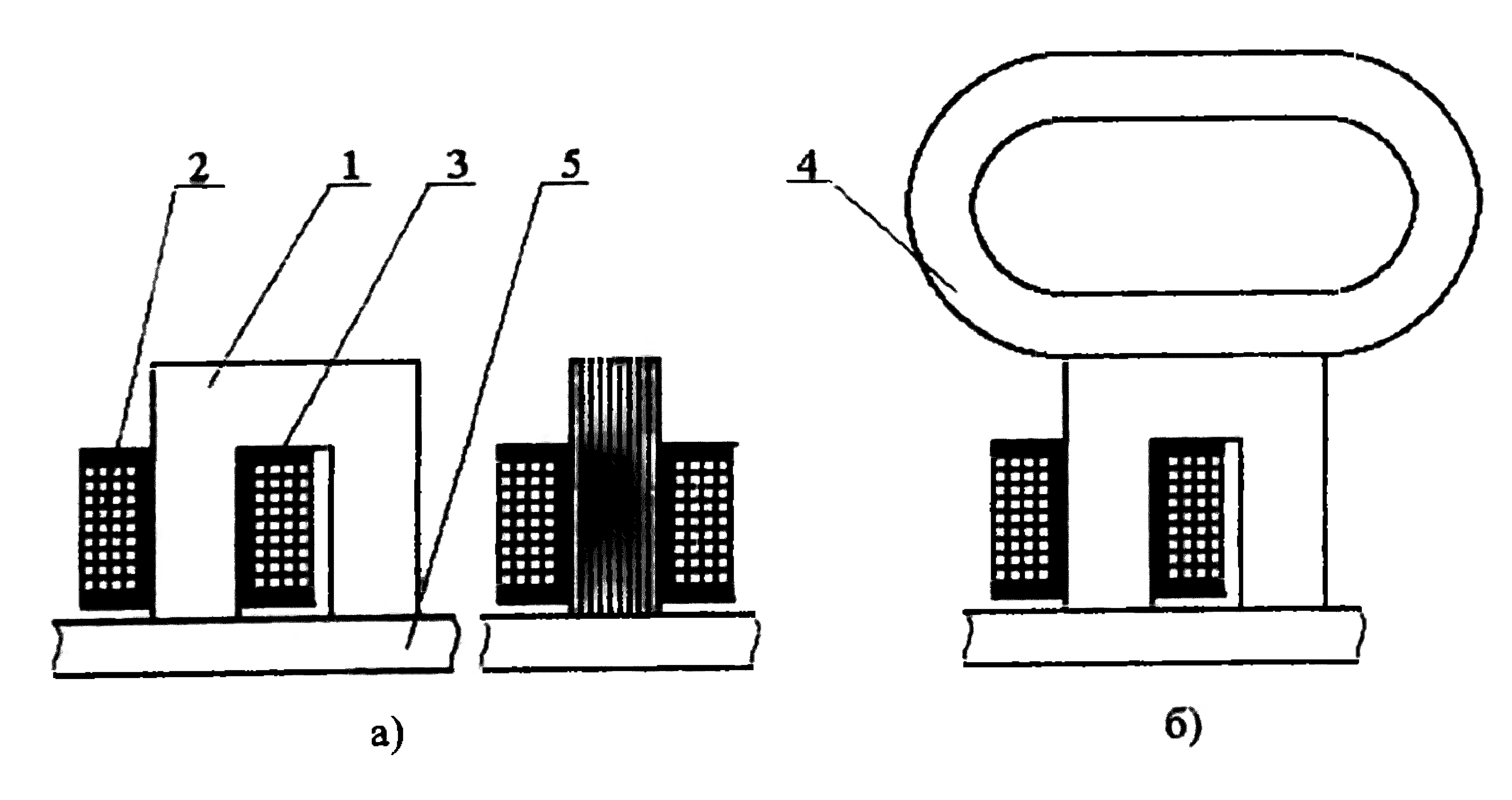


Рисунок 1.3 – Индукционные преобразователи для внешней установки

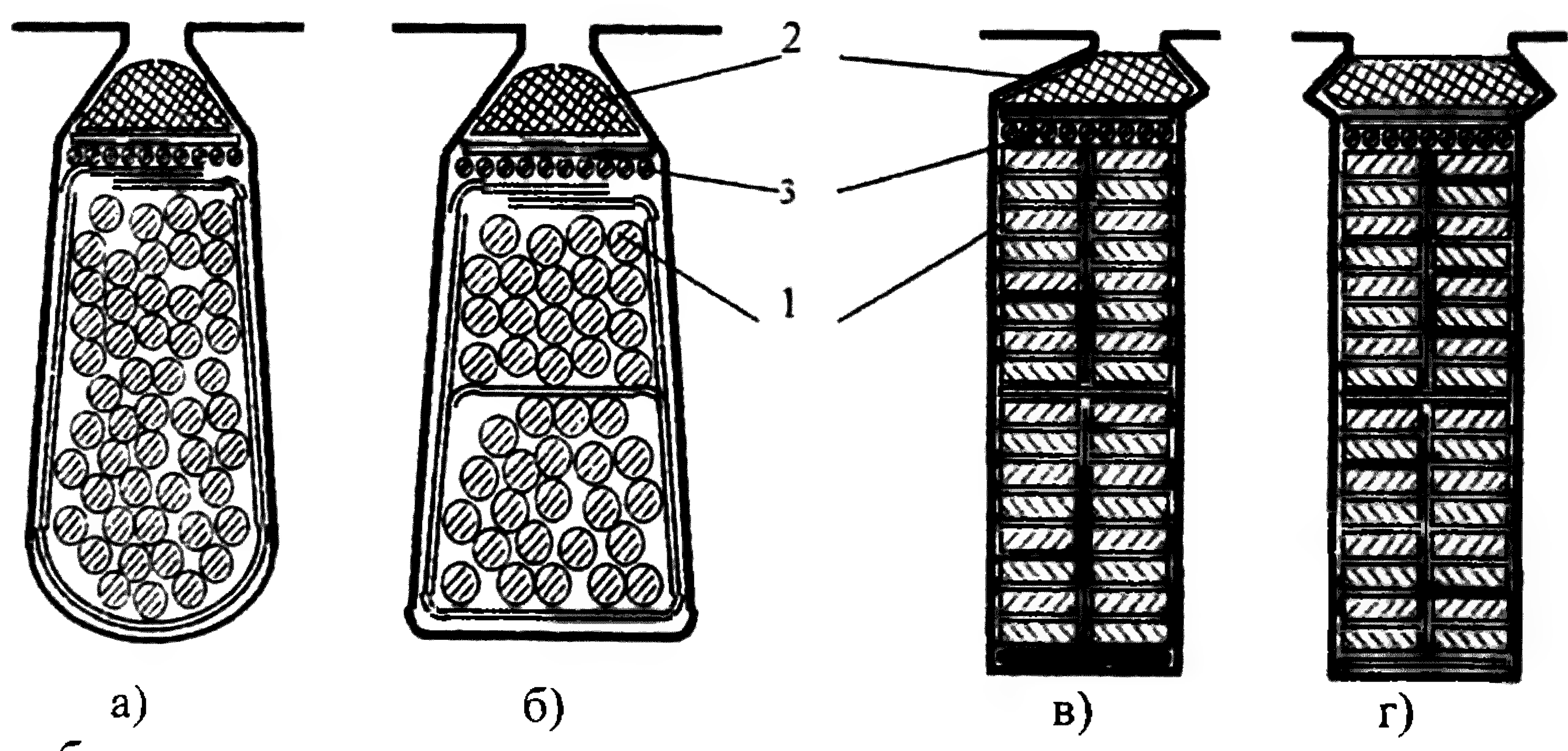
Преобразователь состоит из П – образного сердечника 1 из трансформаторной стали и обмотки 2, намотанной изолированным проводом на каркасе 3 из изоляционного материала. В стационарном варианте преобразователь можно просто приклеить к корпусу

машины, в переносном – он удерживается у корпуса за ручку 4 из изолированного материала. При проведении измерений сердечник преобразователя должен плотно, без воздушного зазора прилегать к торцевому или подшипниковому щиту 5. Как показали иссследования, наиболее удачным техническим решением является использование для изготовления преобразователя магнитной системы от промежуточного реле типа РП-25.

Недостатком преобразователей [10–13] является слабая защита от механических повреждений и влияния внешних магнитных полей окружающих электроустановок. В тоже время конструкция П – образного преобразователя обеспечивает ему достаточно хорошую защиту от внешних магнитных полей.

Конструкция и места размещения индукционных преобразователей внутри АД более разнообразны. Как правило, установка таких преобразователей требует разборки машины и является стационарной. Их устанавливают в пазах статора под клин, в воздушном зазоре и в торцевой зоне АД.

Конструкция обмотки статора позволяет размещать индукционные преобразователи в пазах основной обмотки 1 (рисунок 1.4). В этом случае их укладывают под клин 2 паза в виде дополнительной обмотки 3. Например, как в устройстве для защиты машины переменного тока [14]. В этом случае число пар полюсов дополнительной обмотки принимается в нечетное число раз больше числа пар полюсов основной обмотки статора.



а, б – трапецеидальные полузакрытые пазы, в – полуоткрытый паз, г – открытый паз

Рисунок 1.4 – Индукционные преобразователи для установки в пазах

В АД [15] встроенный блок защиты выполнен в виде дополнительной обмотки, которая состоит из двух включенных встречно - последовательно катушек. Первая катушка намотана с шагом $3q$, а вторая- с шагом q, где q- число пазов на полюс и фазу. Вторая катушка имеет в два раза больше витков, чем первая. Такой преобразователь используется для определения перегрузок, обрыва одной фазы, обрыва стержня “беличьей клетки” и предельного электромагнитного момента. Повышения чувствительности преобразователя можно достичь, если обмотку выполнить из n числа катушек [16]. Число катушек определено числом пазов статора и ротора, числом пазов на полюс и фазу, а также числом пар полюсов основной обмотки и рассчитывается по приведенным в [16] формулам. Повышение чувствительности в сравнении с [15] достигнуто за счет компенсации высших гармонических, которые имеют число пар полюсов в нечетное число раз больше, чем число пар полюсов основной гармоники.

Более простой вариант преобразователя [17], при сохранении чувствительности, получается, если преобразователь выполнить в виде трех катушек с шагом в два зубцовых деления равномерно разнесенных вдоль воздушного зазора.

В устройстве [18] преобразователь представлен в виде одной катушки, охватывающей зубцы вдоль развертки статора на расстоянии 2τ (τ – полюсное деление статора). Он закладывается между двумя слоями подклиновой прокладки, которая отделяет ее с одной стороны от проводников рабочей обмотки, а с другой стороны от пазового клина. Преобразователь измеряет искажения основного магнитного потока, которое вызывается короткими замыканиями и обрывами в обмотках АД.

Иногда катушки преобразователя наматывают на клинья, например в электрической машине [19]. Такое размещение позволяет устанавливать и снимать катушки для ремонта без разборки статора машины, что является предпочтительным. Однако такой преобразователь легко повреждается при сборке или разборке машины, а также при эксцентриситете ротора.

Недостатком преобразователей [15–19] является то, что их невозможно установить без выемки клиньев АД. Другим недостатком является сложность обеспечения необходимого класса изоляции, поскольку область для размещения преобразователя имеет небольшие размеры.

Воздушный зазор между статором и ротором в АД выполняется минимально возможным по условиям производства и надежности

работы. Чем меньше зазор, тем меньше ток холостого хода и выше коэффициент мощности. В машинах мощностью несколько киловатт величина зазора составляет 0,3–0,5 мм, а в машинах большой мощности – несколько миллиметров. Такие размеры не позволяют устанавливать индукционные преобразователи непосредственно в воздушном зазоре, поэтому преобразователи размещают в непосредственной близости от него (рисунок 1.5).

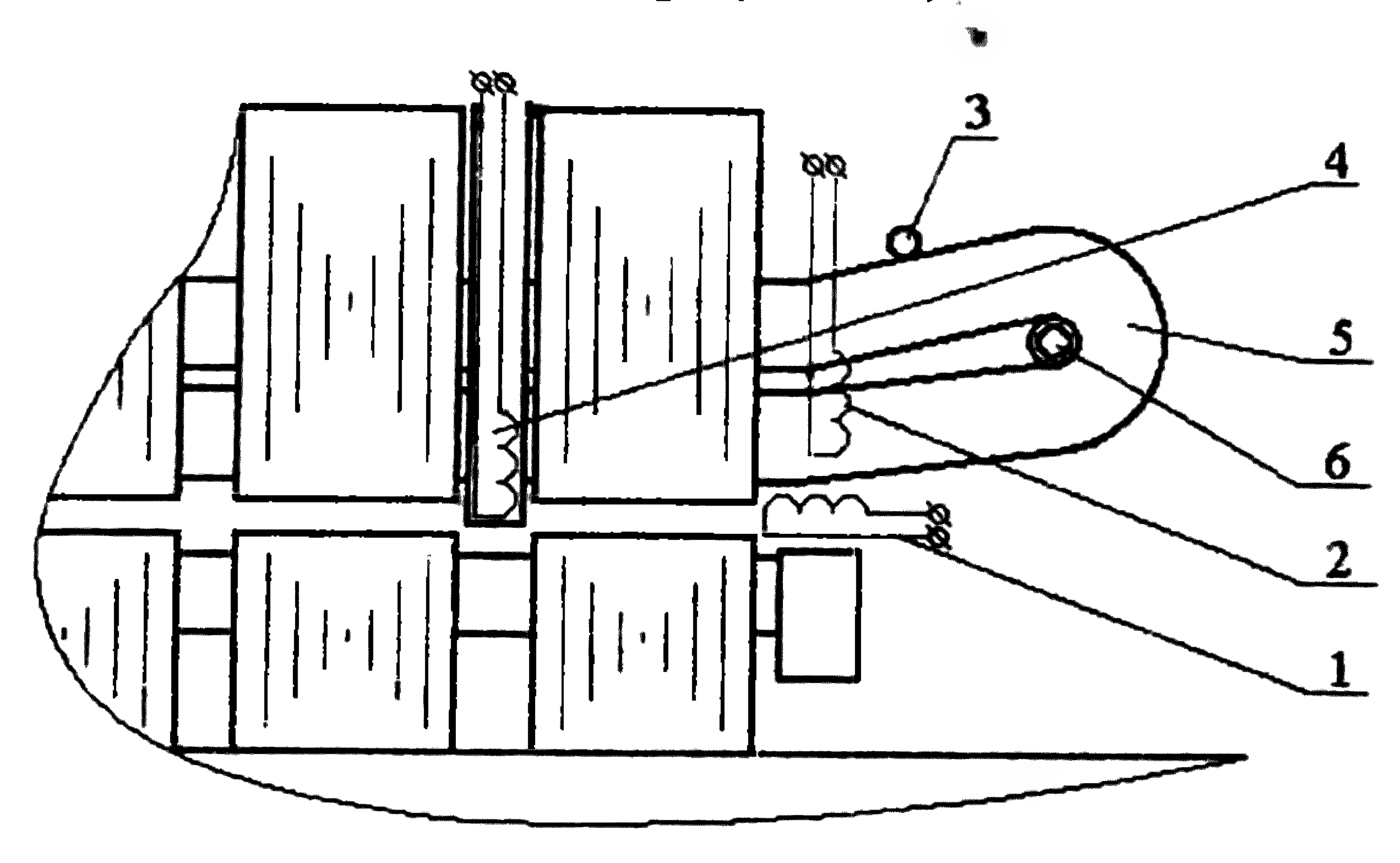


Рисунок 1.5 – Индукционные преобразователи для установки в воздушном зазоре и лобовой части статора

В устройстве [20] преобразователь 1 закреплен на статоре вблизи от воздушного зазора. В электрической машине [21] преобразователь 2 выполнен в виде Г - образного зонда и крепится на статоре вблизи бандажного кольца 3. Установка преобразователей у воздушного зазора позволяет обеспечить требуемую изоляцию и снижает вероятность их повреждения при эксцентриситете, а также при сборке и разборке двигателя.

Преобразователь у воздушного зазора можно разместить и иным образом. Магнитопровод статора для улучшения вентиляции делится на пакеты толщиной 40–50 мм. Между пакетами, с помощью дистанционных прокладок, формируются вентиляционные каналы. Ширина каналов может достигать 10 мм. Поэтому в устройстве [22] для контроля витковых замыканий обмотки статора АД применяются индукционные преобразователи 4, которые помещают в немагнитную трубу и вводят их в воздушный зазор через вентиляционные каналы.

С торцов корпус статора закрывается подшипниковыми или торцевыми щитами, которые преграждают доступ к токоведущим и

вращающимся элементам машины. В АД малой мощности щиты служат опорой для подшипников. Литые щиты имеют гнездо для посадки подшипников. В АД со сварным корпусом подшипник закрепляется на нижней, несущей половине щита при помощи стояка. Торцевая зона АД имеет значительные размеры и в ней легко разместить преобразователь необходимой формы и размеров. Корпус АД надежно защищает их от электрических и механических повреждений.

Лобовая часть 5 секции обмотки статора представляет собой консоль. Для предотвращения изгиба и излома ее в особо тяжелых режимах работы применяют бандажные кольца 3. Преобразователь 6 размещают внутри лобовых частей статора [23]. Он выполняется в виде изолированного кольцевого ферромагнитного сердечника с равномерно уложенной на него обмоткой. Недостатком такого преобразователя является сложность размещения и возможность ложной работы защиты из-за неравномерного насыщения отдельных участков сердечника.

В электрической машине [24] преобразователь представляет собой кусок провода заданной длины, который крепят на внутренней стороне торцевого щита.

В работах [25–29] предлагается использовать кольцевой индукционный преобразователь (КИП). КИП является магнитным трансформатором для измерения магнитных потоков нулевой последовательности в торцевой зоне и может выполняться в виде плоской цилиндрической катушки [25] или одновиткового контура с согласующим трансформатором [26].

Диаметр КИП варьируется от диаметра вала до диаметра кожуха. Чаще всего его принимают равным диаметру лобовой части обмотки статора. Преобразователь идеально вписывается в конструкцию торцевой зоны АД, а установка не вызывает особых затруднений. Обычно КИП крепят к подшипниковому щиту, корпусу АД, лобовой части обмотки статора, бандажному кольцу или его элементам.

ЭДС на выходе КИП зависит от несимметрии магнитной системы машины. Магнитная система АД имеет круговую симметрию относительно оси вращения ротора, поэтому КИП размещают в торцевой зоне так, чтобы его плоскость была перпендикулярна оси вращения ротора, а геометрический центр совпадал с этой осью.

Многовитковый КИП на рисунке 1.1 имеет корпус 15 из диэлектрического материала. В его прямоугольный паз наматывается катушка 16 из изолированного провода. Количество витков катушки и диаметр провода определяются параметрами АД, реагирующего

органа и соединяющего их кабеля. Крепление такого КИП к подшипниковому щиту может осуществляться шпильками. Часто КИП выполняют без корпуса. В этом случае катушку многовиткового КИП заливают эпоксидной смолой и приклеивают прямо к подшипниковому щиту или к лобовым частям обмотки статора.

Одновитковый преобразователь (рисунок 1.6,а) устанавливается в крупных АД. Витком КИП 1 может быть жила силового кабеля с полихлорвиниловой или другой "сухой" изоляцией, из алюминиевого или медного проводника сечением 50–120 мм. Как показал опыт эксплуатации, такая конструкция обладает достаточной жесткостью при значительных габаритах. Крепление витка КИП может осуществляться посредством вязки к лобовым частям обмотки статора, к шпилькам бандажного кольца или к средней части кронштейнов крепления бандажного кольца. Концы витка заключают в наконечники и прессуют. Расстояние между наконечниками определено размерами согласующего трансформатора 2.

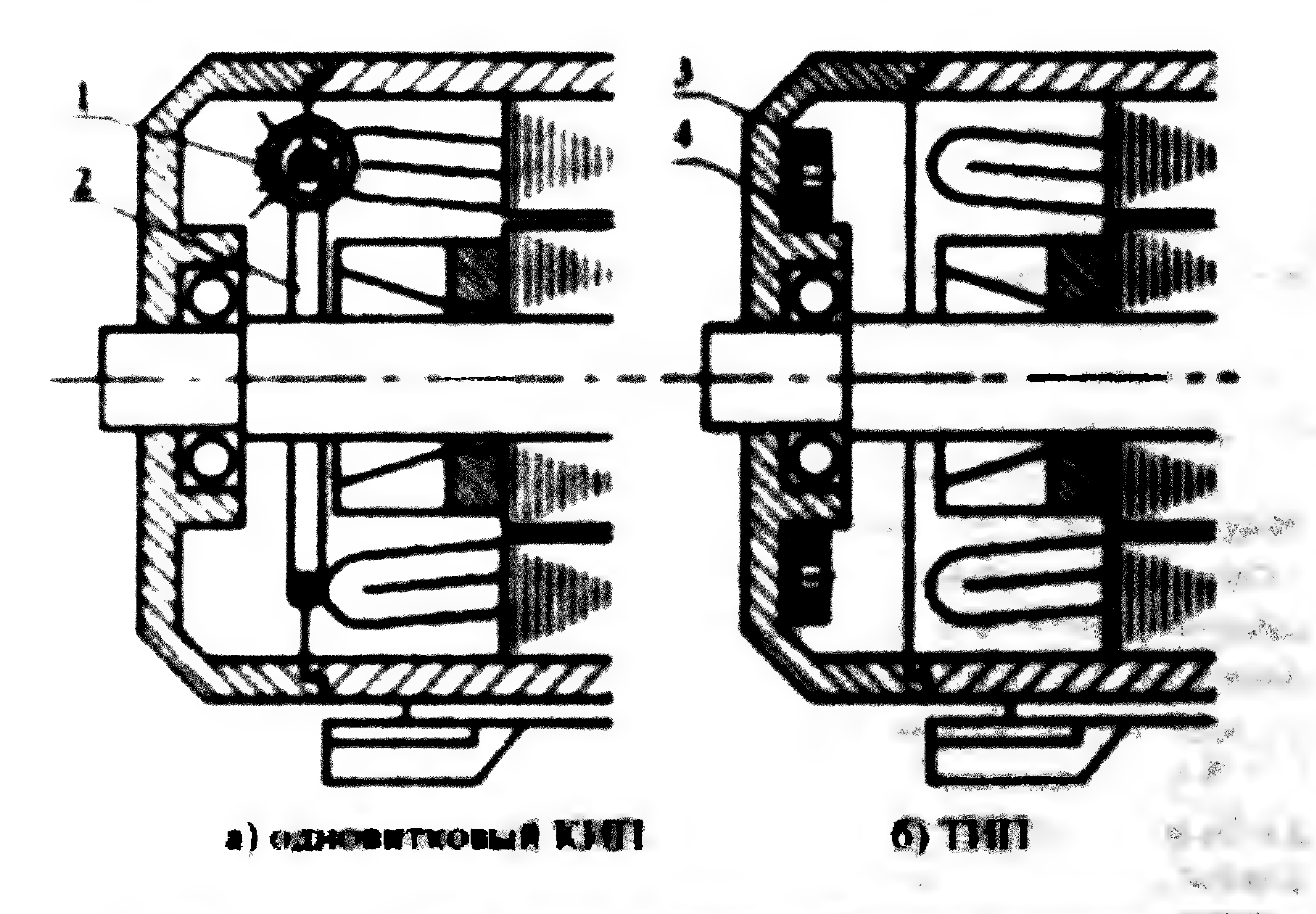


Рисунок 1.6 – Размещение внутри АД одновиткового КИП и ТИП

В качестве согласующего трансформатора применяется трансформатор тока Т-0,66 У3 с коэффициентом трансформации 400/5. Он имеет небольшие размеры и достаточно линейную характеристику при первичном токе до 60–80 А и нагрузке 45–90 Ом.

Возможно применение других трансформаторов с аналогичными размерами и характеристиками.

Иногда преобразователь выполняют в виде комплекта небольших плоских катушек индуктивности [30] – точечных измерительных преобразователей. Их устанавливают как внутри, так и на внешней поверхности АД (рисунок 1.6,а).

Точечные измерительные преобразователи внутренней установки представляют собой магнитные трансформаторы тока. Они могут иметь круглую или прямоугольную форму и обычно располагаются в непосредственной близости от тех токоведущих частей, информацию о которых необходимо получить. Воздушный промежуток между ТИП и токоведущими частями должен быть не меньше регламентируемого ПУЭ.

Конструктивно ТИП для внутренней установки прост. Он имеет каркас 3 из термореактивной пластмассы с двумя металлическими клеммами. В паз каркаса наматывается катушка 4 из изолированного провода. Выводы катушки припаяны к клеммам. К ним же паяют коммутационные проводники. Каркас имеет жесткую конструкцию. Его материал не должен терять жесткость при рабочих температурах машины. Как показал опыт эксплуатации, из соображений надежности работы ТИП в условиях достаточно высоких температур и вибрации для катушки следует выбирать медный провод с диаметром не менее $d_{пр}$=0,12–0,15 мм с термостойкой изоляцией типа ПЭВ-2 и ПЭТВ. Количество витков в катушке ТИП обычно равно $w_п$=2500–9000. Для защиты от воздействия внешней среды в виде вибрации и механических воздействий катушки ТИП пропитывают эпоксидной смолой или бакелитовым лаком. Точные, наперед заданные параметры ТИП получают при изготовлении его кустарным способом. На практике удобней использовать серийно выпускаемые катушки. Хорошо для этих целей подходят катушки от промежуточных реле [32].

Крепление ТИП осуществляется немагнитными кронштейнами к корпусу АД, подшипниковому щиту, бандажному кольцу или непосредственно к лобовым частям обмотки статора. Иногда ТИП просто привязывают жгутом и пропитывают бакелитовым лаком.

Размещение ТИП зависит от целей защиты: в защитах от коротких замыканий – равномерно по окружности, соосной воздушному зазору; при контроле состояния обмотки ротора – вдоль зазора на расстоянии одного или двух зубцовых делений; для контроля эксцентриситета – в непосредственной близости от короткозамыкающего кольца и смещают вдоль оси вращения ротора.

1.2 Ущерб от повреждения короткозамкнутого ротора

В соответствии с данными эксплуатации [3, 33] на долю АД приходится до 30 % отказов всего электрического оборудования. Анализ публикаций [33–37] показал, что достаточно часто происходят механические повреждения, затем идут дефекты обмоток статора. Дефекты короткозамкнутой обмотки ротора встречаются реже. По результатам исследования причин аварий электропривода различных промышленных механизмов [34], было выявлено, что повреждения подшипников составляют 51 %, обмоток статоров – 15,8 %, «беличьих клеток» роторов – 4,7 %, соединительных валов и муфт – 2,4 % и внешних устройств – 15,6 %. Порядка 10,5 % составили неустановленные повреждения.

Согласно [37] на «беличьи клетки» роторов приходится около 10%. В то же время экспериментальные исследования, проведенные на Павлодарских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-3, Экибастузской ГРЭС-1 и ГРЭС-2, а также Аксуской ГРЭС показали, что повреждаемость «беличьих клеток» АД значительно выше, так как в эксплуатации находится до 35-40 % двигателей с поврежденной «беличьей клеткой» ротора.

Есть основания полагать, что такое различие в оценке повреждаемости возникает из-за сложности диагностики этого вида повреждения. Эта сложность в основном вызвана ограниченной чувствительностью применяемых на практике систем диагностики и недостаточной квалификацией экспертов.

К наиболее распространенным повреждениям «беличьей клетки» ротора относят обрыв стержней и разрыв короткозамыкающих колец. При этом повреждения «беличьей клетки» можно условно разделить на врожденные и приобретенные.

Врожденные повреждения «беличьей клетки» возникают при изготовлении на заводе и во время ремонта, то есть, обусловлены технологическими дефектами. Так в случае изготовления алюминиевой короткозамкнутой обмотки это уменьшение сечения отдельных ее стержней вследствие недоброкачественной заливки или даже их полный обрыв [33]. В сварной «беличьей клетке» это, как правило, плохое качество распайки мест соединения стержней с короткозамыкающими кольцами.

Значительная часть недоброкачественно изготовленных роторов попадает в эксплуатацию при отсутствии явных обрывов стержней – утонениях, большой пористости и т.д. Это связано с трудностью выявления таких дефектов методами, применяемыми на заводах-изготовителях.

Приобретенные повреждения возникают в процессе эксплуатации

под воздействием ударных циклических и знакопеременных нагрузок на валу, повышенной вибрации, частых пусков, а также высоких температур.

Обрыв стержня может произойти либо в пазовой части, либо на конце, выступающем из активной стали сердечника. Обрыв выступающего конца стержня особенно неприятен, так как при этом выходит из строя не только обмотка ротора, но и весьма часто обмотка статора, так как оторванные концы стержней под действием центробежных сил отгибаются в направлении лобовых частей статорной обмотки и повреждают ее.

Часто в начале развития повреждения в стержне появляется трещина, которая только нарушает нормальную работу короткозамкнутой обмотки. В большинстве случаев трещина довольно быстро увеличивается и приводит к полному разрыву стержня. При этом двигатель может выйти из строя в самое неподходящее для производственного процесса время.

В электродвигателях, работающих в условиях частых пусков и при других динамических нагрузках, количество дефектов ротора возрастает. Например, в двигателях с большими окружными скоростями могут возникнуть обрыв стержней и разрывы короткозамыкающих колец под действием центробежных сил из-за «усталости» металла.

Одной из причин повреждения обмотки ротора является ослабление стержней в пазу, что приводит к увеличению вибраций. Это сопровождается знакопеременными деформациями, в результате которых трещины образуются в пазовой части, в местах выхода стержня из паза или в местах соединения с короткозамыкающими кольцами.

Деформация и разрывы деталей клеток происходят также от механических перенапряжений вследствие действия высоких температур. Например, при заклинивании исполнительных органов горных машин [36], АД переходит на работу в режиме короткого замыкания при номинальном напряжении. В результате вся электромагнитная мощность, переданная на ротор, выделяется в его обмотке в виде тепла.

Тепловая энергия, возникающая в стержнях ротора, распространяется в двух направлениях: в радиальном – через сердечник ротора, и аксиальном – по стержням ротора к короткозамыкающим кольцам. В результате действия высоких температурных нагревов стержней и колец, а также перепада температуры между кольцами и пакетом ротора происходит

деформация и разрывы деталей клеток от механических перенапряжений.

Кольцо ротора при нагреве смещается в радиальном направлении, что может привести к его разрыву или к нарушению стержней в месте перехода в короткозамыкающее кольцо.

Нередко из-за высокой температуры нагрева стержней происходит выплавление роторной обмотки. Из-за разности температуры по высоте стержня между верхними и нижними слоями при пуске достигающей 120 °С, происходит пластическая деформация стержней. Так как стержень в пазу закреплен плотно, и изогнуться не может, в нем образуются механические напряжения, особенно в верхних слоях, и в этой зоне возникают трещины.

Литая «беличья клетка» может выплавляться при эксцентриситете ротора, когда железо ротора соприкасается с железом статора и возникает трение с выделением тепла.

При наличии утончения стержней, раковин, большой пористости, или повышенной хрупкости металла заливки перегрев и расплавление дефектных участков происходит значительно быстрее.

Обнаружить трещины или обрыв стержней при работе двигателя не всегда возможно. Трещины и некачественные пайки стержней увеличивают активное сопротивление обмотки ротора, ухудшают пусковые характеристики, нарушают нормальную работу АД. Кроме того, возникают пульсации тока фаз статора, колебания частоты вращения и увеличение вибрации и шума АД.

По результатам исследования эксплуатации АД, работающих в повторно-кратковременном режиме [35] было выявлено, что нарушение целостности стержней беличьей клетки ротора в процессе работы вызывает снижение перегрузочных свойств АД. При этом имеют место случаи, когда после кратковременной работы перегрузочные свойства снижаются на столько, что делает эти двигатели непригодными для дальнейшей работы.

Из приведенного анализа становится ясно, что значительная часть АД на производстве работает с оборванными стержнями «беличьей клетки», так как сам по себе этот режим не грозит немедленным выходом из строя. Особенно недогруженного АД. В некоторых случаях АД с таким повреждением работают не один год. Большую опасность в этом случае представляет повышенное энергопотребление поврежденного АД. Поэтому в настоящее время давать оценку повреждению «беличьей клетки» ротора следует именно с этой стороны.

Так как эксперименты с АД с обрывом одного и нескольких

стержней вопрос достаточно сложный, особенно если он распространяется на несколько сотен различных по конструкции, мощности напряжению питания АД, то для ориентировочной оценки повышения расхода электроэнергии проще воспользоваться математическим моделированием. Здесь используется математическая модель АД, дифференциальные уравнения которой составлены для междуфазных напряжений по методу контурных токов [38].

Для оценки величины повышения расхода электроэнергии применялась следующая методика. Активные и реактивные электрические потери в фазах обмотки ротора по [1] определялись как

$$P = r_2 I_2^2, \quad Q = x_2 I_2^2,$$

где r_2 и x_2 – активное и реактивное эквивалентные сопротивления фаз короткозамкнутой обмотки;

I_2 – ток фазы ротора, равный току в соответствующем участке короткозамыкающего кольца.

Исходя из энергетических соображений, сумма потерь в фазах обмотки должна быть равна сумме потерь в стержнях и элементах кольца. Так для одной фазы ротора потери составят

$$P = r_2 I_2^2 = r_c I_c^2 + 2 r_k I_k^2, \quad Q = x_2 I_2^2 = x_c I_c^2 + 2 x_k I_k^2,$$

где $r_c(r_k)$ – активные сопротивления стержня (участка кольца) «беличьей клетки» ротора;

$x_c(x_k)$ – реактивные сопротивления стержня (участка кольца) «беличьей клетки» ротора;

I_c и I_k – токи в стержне и участке кольца.

Общие электрические потери в короткозамкнутой обмотке можно определить как сумму потерь всех фаз ротора

$$\sum_{i=1}^{z_2} r_{2i} I_{2i}^2 = \sum_{i=1}^{z_2} r_{ci} I_{ci}^2 + 2\sum_{i=1}^{z_2} r_{ki} I_{ki}^2, \quad \sum_{i=1}^{z_2} x_{2i} I_{2i}^2 = \sum_{i=1}^{z_2} x_{ci} I_{ci}^2 + 2\sum_{i=1}^{z_2} x_{ki} I_{ki}^2, \quad (1.1)$$

где z_2 - число фаз короткозамкнутой обмотки, равное числу ее стержней.

Используя (1.1) можно определить потери как до повреждения стержней и колец, так и после. Если пренебречь вторым слагаемым в этом выражении из-за небольших размеров элемента кольца, то отношение потерь до аварии и после будет пропорционально отношению квадратов токов в стержнях ротора

$$k_r = P/P^* \approx I_c^2/I_c^{*2},$$

$$k_x = Q/Q^* \approx I_c^2/I_c^{*2},$$

где $P\ (Q)$ и $P^*(Q^*)$ – активные (реактивные) мощности неповрежденного ротора и при обрыве стержней.

В таблице 1.1 представлены результаты расчетов токов и энергетических показателей асинхронного двигателя АО-31-4 [38, 39].

Таблица 1.1 – Энергетические показатели АД при повреждении ротора

Режим работы	Ток фазы, А	$\cos\varphi$, отн. ед.	Потребляемая мощность P, кВт
Без повреждения	5,3577	0,8278	2,927
При повреждении одного стержня	5,4646	0,8318	2,999
При повреждении двух стержней	5,6617	0,8365	3,126
При повреждении трех стержней	5,8295	0,8395	3,230

Из нее видно, что при повреждении одного, двух и трех стержней ротора фазный ток увеличивается на 1,995 %, 5,674 % и 8,806 %, $\cos\varphi$ повышается на 0,483 %, 1,05 % и 1,413 %. При этом расход электроэнергии возрастает на 1,06 %, 2,19 % и 3,75 % соответственно. Однако результаты расчета показывают, что его величина уменьшается с увеличением числа пар полюсов и стержней «беличьей клетки». Поэтому потери в АД ДАЗО 15-39-10 и ДАЗО 17-69-8/10 в 2,5–3 раза меньше.

Исходя из полученных результатов дополнительные затраты на эксплуатацию АД из-за повышения расхода электроэнергии возрастают на

$$\Delta З_{ээ} = \Delta P \, n_г \, Ц_{ээ} \quad ,$$

где $\Delta P = P^{*} - P$ – разность потребляемой мощности двигателя с целыми и поврежденными стержнями, кВт;

$n_г$ – число часов работы АД в год ($n_г$=8760 ч при непрерывном производстве);

$Ц_{ээ}$ – тариф на электроэнергию.

Результаты расчета приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Стоимостные показатели АД при повреждении ротора

Тип двигателя	Потребляемая мощность, *кВт*	Стоимость двигателя, руб.	Дополнительные затраты на электрическую энергию в рублях при обрыве		
			одного стержня	двух стержней	трех стержней
АОЛ2-11-4	0,6	200-500	49,18	92,9	192,6
АО-31-4	2,7	400-800	231,2	437,8	605
AZM 8000/6000	8000	2-3млн.	122722	852733,4	1290032,6

Несложный расчет показывает, что при эксплуатации двигателя с повреждением даже одного стержня годовые потери электроэнергии будут сопоставимы со стоимостью самого двигателя.

1.3 Методы моделирования токов при повреждении короткозамкнутого ротора

Основными элементами ротора АД являются вал, цилиндрический магнитопровод и короткозамкнутая обмотка в виде «беличьей клетки». Магнитопровод изготавливают из цельных вырубок, которые получают из листов электротехнической стали. Во внутреннее отверстие цилиндра запрессовывается вал, а на внешней стороне цилиндра ротора в пазах помещают стержни «беличьей клетки», концы которых замыкают накоротко медными или

алюминиевыми кольцами. Обмотку короткозамкнутого ротора АД с высотой оси вращения $h \leq 355$ мм выполняют литой из алюминия или его сплавов. При большей высоте оси «беличья клетка» сварная. Ее стержни крепят в пазах чеканкой по всей длине сердечника через шлиц паза, а их концы размещают в канавках короткозамыкающих колец и приваривают.

Практически во всех обнаруженных автором публикациях [10, 40-44] при наличии повреждений в «беличьей клетке» принято рассматривать токи во всех ее элементах как сумму токов в них до аварии и добавочных токов. Так в соответствии с рисунком 1.7 токи в i - ом стержне и элементе кольца

$$\dot{I}^{*}_{ci} = \dot{I}_{ci} + \Delta\dot{I}_{ci} \text{ и } \dot{I}^{*}_{ki} = \dot{I}_{ki} + \Delta\dot{I}_{ki}, \quad (1.2)$$

где $\dot{I}^{*}_{ci}$ и $\dot{I}^{*}_{ki}$ - токи в i – ом стержне и элементе кольца при повреждении «беличьей клетки»;

$\dot{I}_{ci}$ и $\dot{I}_{ki}$ - токи в i – ом стержне и элементе кольца целой «беличьей клетки»;

$\Delta\dot{I}_{ci}$ и $\Delta\dot{I}_{ki}$ – добавочные токи в i - ом стержне и элементе кольца.

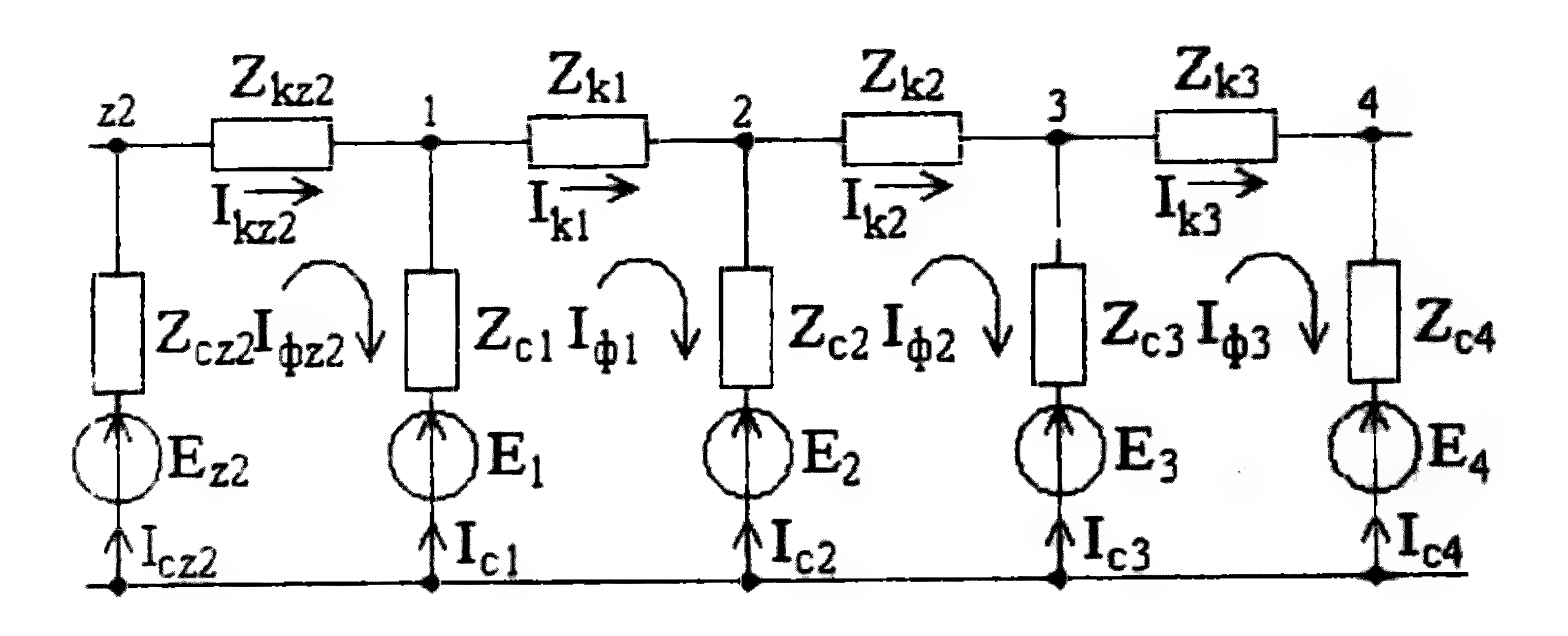


Рисунок 1.7 – Распределение токов в фазах обмотки ротора

Если считать магнитное поле в воздушном зазоре синусоидальным, а обмотку ротора симметричной, то соотношения между токами в стержнях и элементах колец «беличьей клетки» традиционно определяют согласно [40]. «Беличью клетку» заменяют многофазной обмоткой, начала и концы которой соединены вместе в

замкнутую накоротко многолучевую звезду. Ее фаза представляет собой одновитковый контур, состоящий из двух соседних стержней и размещенных между ними участков колец. Под током i-й фазы $I_{\phi i}$ понимается ток i-го контура, равный току I_{ki} в соответствующих участках колец. При симметрии роторной обмотки токи фаз одинаковы и равны I_2 , а их комплексы образуют симметричную звезду и сдвинуты относительно друг друга по фазе на угол

$$\alpha = 2\pi p / z_2,$$

где p и z_2 – число пар полюсов АД и стержней в «беличьей клетке».

С учетом рисунка 1.7 и уравнения Кирхгофа для i - го узла

$$\dot{I}_{ci} = \dot{I}_{ki} - \dot{I}_{k(i-1)},$$

где действующее значение тока i-го стержня определяется по формуле

$$I_{ci} = 2I_{ki}\sin(\pi p / z_2).$$

Электродвижущая сила фазы равна разности ЭДС стержней, входящих в контур

$$\dot{E}_{ki} = \dot{E}_{c(i+1)} - \dot{E}_{ci},$$

а действующее значение ЭДС i-го стержня

$$E_{ci} = E_{ki} / 2\sin(\pi p/z_2).$$

Сопротивление стержня и элемента кольца

$$Z_k = R_k + jX_k \text{ и } Z_c = R_c + jX_c,$$

где R_c и X_c – активное и индуктивное сопротивление стержня;

R_k и X_k – активное и индуктивное сопротивление элемента кольца.

Согласно [1] сумма электрических потерь в фазах обмотки ротора должна быть равна сумме потерь во всех стержнях и элементах короткозамыкающих колец, то есть

$$z_2 R_2 I_2^2 = z_2 R_c I_c^2 + 2 z_2 R_k I_k^2 .$$

Подставив в это выражение действующее значение тока стержня, получим эквивалентное активное сопротивление фазы симметричной обмотки ротора

$$R_2 = R_c + 2R_k \Big/ \left(2\sin\frac{\pi p}{z_2}\right)^2 .$$

Аналогично из равенства реактивных мощностей

$$z_2 I_2^2 X_2 = z_2 X_c I_c^2 + 2 z_2 X_k I_k^2 ,$$

эквивалентное реактивное сопротивление фазы обмотки ротора

$$X_2 = X_c + 2X_k \Big/ \left(2\sin\frac{\pi p}{z_2}\right)^2 .$$

Для определения тока I_2 в обмотке ротора в симметричном режиме могут быть использованы различные математические модели, описывающие процессы электромеханического преобразования энергии в АД.

Для симметричного АД с короткозамкнутым приведенным ротором процессы преобразования энергии в установившихся режимах описываются уравнениями [1, 41]

$$\dot I_0 = \dot I_1 + \dot I_2'; \; \dot U_1 = -\dot E_0 + \dot I_1 Z_1, \; 0 = \dot E_0 + \dot I_2' Z_2' - \dot I_2' R_2'(1-s)/s ,$$

$$s = (\omega_1 - \omega_2)/\omega_1, \; I_2' = k_I I_2, \; Z_2' = k_Z Z_2, \; R_2' = k_Z R_2 ,$$

где $\dot U_1$, $\dot I_1$ и Z_1 – соответственно напряжение, ток и сопротивление фазы статора;

$\dot I_0$ и $\dot E_0$ – ток и ЭДС холостого хода;

$\dot I_2'$ – приведенный к статору ток обмотки ротора;

Z'_2 – приведенное к статору сопротивление обмотки ротора;

s – скольжение ротора;

ω_1 и ω_2 – угловые скорости вращения поля статора и ротора;

k_I и k_z – коэффициенты приведения токов и сопротивлений;

k_{01} и k_{02} – обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора;

w_1 и w_2 – число витков в фазах обмоток статора и ротора.

Коэффициент приведения токов

$$k_I = \frac{m_2 w_2 k_{02}}{m_1 w_1 k_{01}}.$$

Коэффициент приведения сопротивлений

$$k_Z = \frac{m_2 (w_2 k_{02})^2}{m_1 (w_1 k_{01})^2}.$$

В недалеком прошлом, по известным причинам, в теории машин широко использовались разработанные на базе этих уравнений схемы замещения и векторные диаграммы. Такая схема замещения АД, приведена на рисунке 1.8, где $Z_0 = R_0 + jX_0$; R_0 и X_0 – активная и реактивная составляющие главного сопротивления.

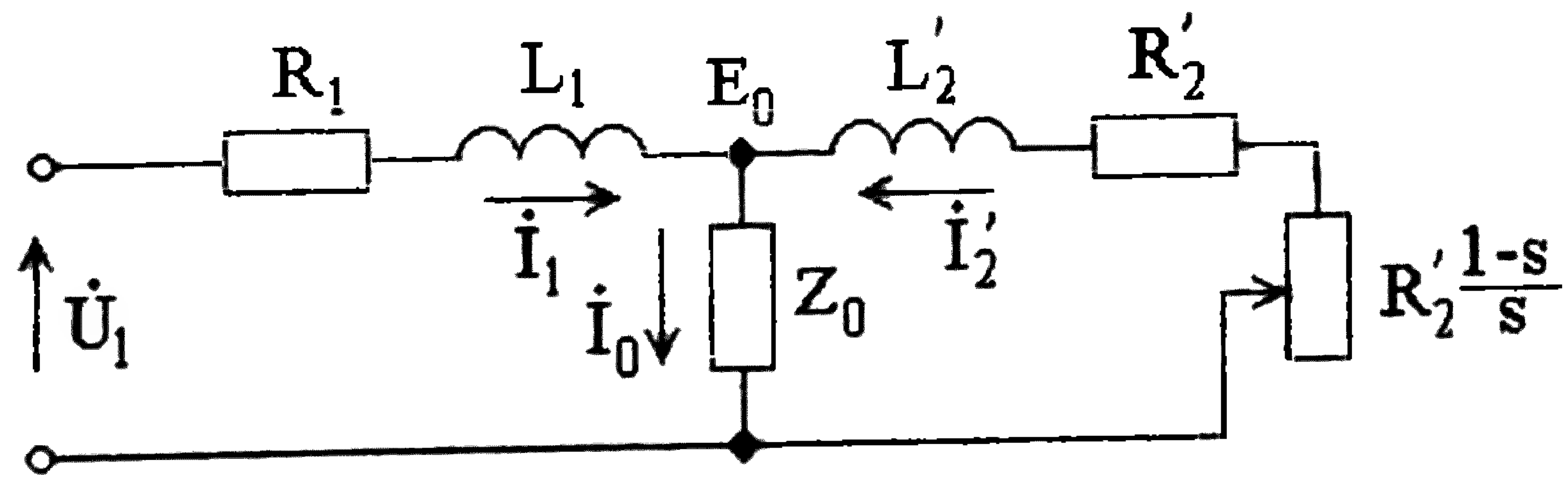


Рисунок 1.8 – Схема замещения АД

Главное активное сопротивление и индуктивность m_1 - фазной обмотки определяют экспериментально или расчетным путем как

$$R_0 = \frac{P_м}{m_1 I_0} \text{ и } X_0 = j\omega L_{11},$$

где $P_м$ – магнитные потери;

τ – полюсное деление;

l_δ – длина воздушного зазора;

δ и k_δ – величина воздушного зазора и коэффициент Картера [1, 42];

L_{11} – индуктивность обмотки, которую определяют как

$$L_{11} = \frac{6m_1 \mu_0}{p\pi^2}\left(w_1 k_{01}\right)^2 \frac{\tau l_\delta}{\delta k_\delta}.$$

Если считать, что параметры схемы замещения постоянны и не зависят от режима работы, то значение тока I_2 можно определять по круговой диаграмме. Такой способ отражения процессов преобразования энергии в АД может использоваться только для расчета процессов в установившемся режиме и при круговом поле в воздушном зазоре.

Сложность аналитических исследований переходных процессов АД обусловлена тем, что эти процессы обычно протекают при одновременном изменении нескольких факторов, от сочетания которых зависит их характер. Учет всех сложных взаимосвязей приводит к необходимости составления систем нелинейных уравнений и чрезвычайно затрудняет задачу аналитического исследования переходных процессов в электрических машинах. Выбираемая форма записи уравнений должна обеспечить наибольшую простоту и точность.

Первые модели динамических режимов в виде дифференциальных уравнений, были предложены в работах Р. Парка и А. А. Горева для синхронных машин. Позднее в работах Г. Крона были предложены уравнения динамики для обобщенной электрической машины. Математические модели на базе дифференциальных уравнений значительно превосходят схемы замещения и векторные диаграммы по получаемой информации и имеют более глубокий физический смысл.

Полная система уравнений переходного процесса должна включать в себя дифференциальные уравнения напряжений обмоток и уравнения движения вращающихся частей машины. При

промышленной частоте 50 Гц обмотки рассматриваются как электрические цепи с сосредоточенными параметрами, так как при этом длина электромагнитной волны много больше линейных размеров обмоток. При этом токами, протекающими в обмотках статора и ротора, в воздушном зазоре машины формируется магнитное поле. Таким образом, наилучшим подходом к решению задач динамики электрических машин является совместное использование теории цепей и теории поля. Теория поля позволяет определять с достаточной точностью параметры машины, а, используя уравнения цепей, можно рассчитывать показатели машины в переходных и установившихся режимах.

В работах И. П. Копылова [41] и А. В. Иванова-Смоленского [1] приведена математическая модель электромеханического преобразователя для описания процессов преобразования энергии в машине с бесконечным числом гармоник и бесконечным числом контуров на статоре и роторе. Согласно этой модели все напряжения и токи в ней образуют единую и идеальную систему с пространственным сдвигом обмоток на 90° и временным сдвигом токов на 90 электрических градусов. Токи и напряжения в этой модели достаточно полно отражают процессы преобразования энергии в АД при круговом поле в воздушном зазоре. По ним легко определить электромагнитный момент, а также активную и реактивную мощность.

Модель обобщенного электромеханического преобразователя с m обмотками на статоре и n обмотками на роторе имеет вид

$$[U]=[Z][I],M_э=M[I_sI_r],$$

где $[U]$ и $[I]$ – субматрицы напряжений и токов, включающие напряжения и токи в обмотках статора и ротора по осям α и β;

$[Z]$ – сложная матрица сопротивлений;

$M_э$ – электромагнитный момент;

M – взаимная индуктивность;

$[I_s,I_r]$ – бесконечное число пар произведений токов в обмотках статора и ротора.

Простейшая схема машины с круговым полем представляет собой двухфазную машину с двумя парами обмоток на статоре и роторе. Её математическая модель представляет собой систему из четырех нелинейных уравнений напряжений

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{r\alpha} \\ u_{s\beta} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s\alpha} + \frac{d}{dt} L_{s\alpha} & \frac{d}{dt} M & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt} M & R_{r\alpha} + \frac{d}{dt} L_{r\alpha} & L_{r\beta}\omega_r & M\omega_r \\ -M\omega_r & -L_{r\alpha}\omega_r & R_{r\beta} + \frac{d}{dt} L_{r\beta} & \frac{d}{dt} M \\ 0 & 0 & \frac{d}{dt} M & R_{s\beta} + \frac{d}{dt} L_{s\beta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix},$$

и уравнения электромагнитного момента и движения

$$M_э = M(i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}), \quad J \frac{d\omega_2}{dt} \pm M_c = M_э,$$

где $u_{s\alpha}, u_{s\beta}, u_{r\alpha}, u_{r\beta}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ – соответственно напряжения и напряжения и токи в обмотках статора и ротора по осям α и β;

$R_{s\alpha}, R_{s\beta}, R_{r\alpha}, R_{r\beta}$ – активные сопротивления обмоток статора и ротора;

$L_{s\alpha}, L_{s\beta}, L_{r\alpha}, L_{r\beta}$ – полные индуктивности обмоток статора и ротора по осям α и β;

M_c – момент сопротивления;

J – момент инерции вращающихся частей двигателя и механизма.

Наиболее часто используются уравнения в координатных осях α и β, расположенных под углом 90°, неподвижных относительно статора (скорость вращения осей $\omega_к$ равна нулю). Существуют модели в координатных осях d и q, неподвижных относительно ротора (скорость вращения осей $\omega_к$ равна скорости вращения ротора ω_2) и в системе координат u, v, вращающихся с произвольной скоростью.

В этой модели несинусоидальность питающего напряжения и спектр высших гармоник поля в воздушном зазоре учитывают введением дополнительных уравнений и коэффициентов. Большое число уравнений, необходимость преобразования координат и получение результата в неявном виде делает применение такой

математической модели затруднительным.

Преобразование координат позволяет упростить уравнения и получить постоянные коэффициенты перед переменными, но не уменьшает число уравнений. Кроме этого, результатом решения являются проекции напряжений и токов на оси, а не реальные величины, что в отдельных случаях значительно затрудняет анализ процессов в АД.

Наиболее полно описывает процесс преобразования энергии в трехфазных АД математическая модель машины с фазовыми координатами [1]. Она описывает электромеханическое преобразование энергии с учетом нелинейностей параметров, несинусоидальности и несимметрии напряжений в переходном и установившемся режимах. Модель включает в себя систему дифференциальных уравнений составленных по законам Кирхгофа для фазных напряжений обмоток статора и ротора

Применение системы дифференциальных уравнений электрических машин с фазовыми координатами, составляемых по законам Кирхгофа для фазных напряжений, затруднено, из-за сложности определения величины фазных напряжений (поскольку часто отсутствуют выводы нулевого тока обмоток). Кроме того, система содержит большое число неизвестных и периодически изменяющиеся во времени коэффициенты

Все методы определения дополнительных токов в элементах кольца и стержнях при обрыве части из них основаны на том, что ток в поврежденном стержне в произвольном режиме работы АД равен нулю. Распределение дополнительных токов в фазах обмотки ротора при обрыве одного стержня приведено на рисунке 1.9.

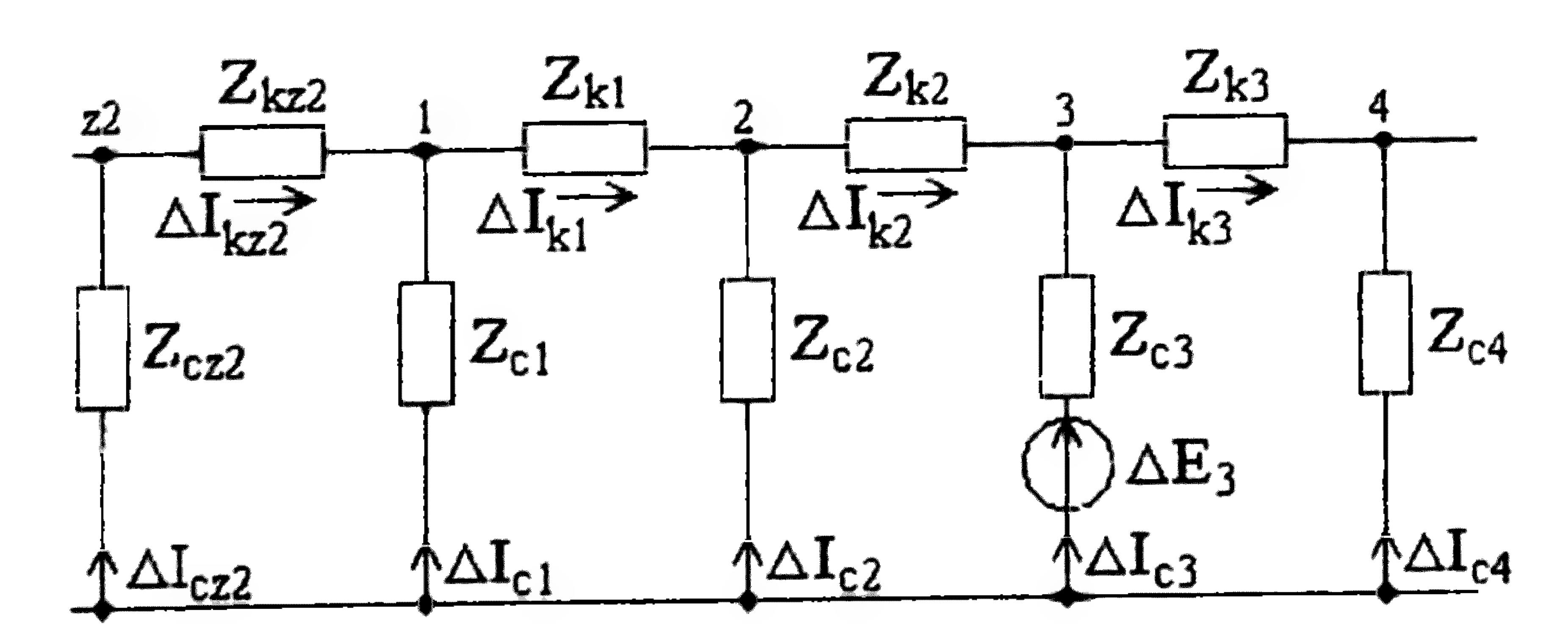


Рисунок 1.9 – Схема распределения дополнительных токов в фазах обмотки ротора при обрыве третьего стержня

При таком представлении, например при обрыве третьего стержня, в соответствии с (1.2) ток в нем должен быть равен нулю

$$\dot{I}_{c3}^{*} = \dot{I}_{c3} + \Delta\dot{I}_{c3} = 0,$$

а величина дополнительного тока в поврежденном стержне

$$\Delta\dot{I}_{c3} = -\dot{I}_{c3}. \qquad (1.3)$$

Определение величины дополнительных токов в неповрежденных стержнях в различных работах осуществляется разными методами.

В работе [10] предлагают считать, что распределение дополнительного тока по стержням клетки ротора, без учета сопротивлений короткозамыкающего кольца, имеет вид, приведенный рисунке 1.10.

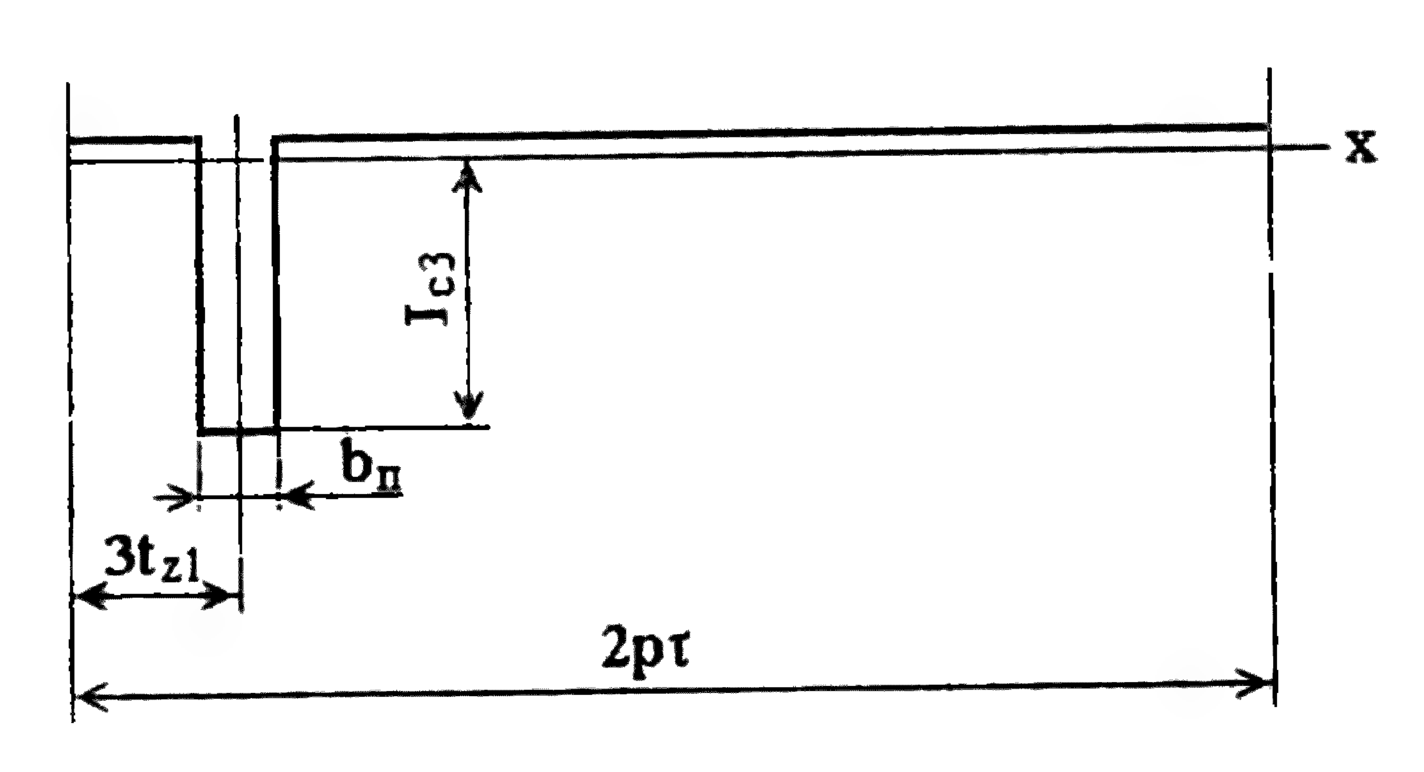


Рисунок 1.10. – Распределение дополнительных токов в стержнях обмотки ротора

Дополнительный ток в поврежденном стержне определяется по (1.3), а дополнительные токи в неповрежденных стержнях равны по величине и в соответствии с рисунком 1.10 определяются как

$$\Delta I_{ci} = -\Delta I_{c3}\frac{b_n}{2p\tau - b_n},$$

где b_n - ширина стержня ротора.

Данный метод позволяет только ориентировочно оценить перераспределение токов в стержнях при полном обрыве одного из них.

В работе [43] рассматривается случай, когда демпферная обмотка тихоходного двигателя имеет один стержень с иным сопротивлением. Например, если это третий стержень, то его сопротивление

$$Z_{c3} = Z_c + \Delta Z$$

где ΔZ – дополнительное сопротивление стержня.

Затем в соответствии со схемой на рисунке 1.9 составляется система уравнений для контуров, образованных стержнями с одинаковыми сопротивлениями и контуров, образованных различными по сопротивлению стержнями. В соответствии с первым законом Кирхгофа составляют также уравнения токов для каждого узла схемы. Расчет распределения дополнительных токов сводится к вычислению восьми постоянных, входящих в систему разностных уравнений и определяемых граничными условиями, составленными по первому и второму законам Кирхгофа.

В этом методе подробно рассматривается расчет демпферных обмоток, которые имеют свои особенности и отличаются от короткозамкнутых. Кроме того, при наличии нескольких стержней с различными сопротивлениями предлагается использовать метод наложения, но в статье этот случай не рассмотрен.

В работе [44] на основе методики [43] рассмотрен способ определения токов в стержнях и участках кольца ротора с несимметричной «беличьей клеткой». При этом причиной несимметрии может быть как повреждения короткозамыкающих колец и стержней, так и изменение переходных сопротивлений в стыке стержень – короткозамыкающее кольцо.

В этом методе по первому закону Кирхгофа составляется система уравнений для каждого узла электрической схемы

$$\dot{I}_{k_1} = \dot{I}_{c_1} + \dot{I}_{k_{z2}},$$

$$\dot{I}_{k_2} = \dot{I}_{c_2} + \dot{I}_{k_1}, \ldots$$

Затем по второму закону Кирхгофа определяют значение ЭДС контуров

$$\dot{E}_{k_1} = (\dot{I}_{c_1} - \dot{I}_{c_{z2}})Z_{c_1} - 2\dot{I}_{k_{1z2}} Z_{k_1},\ \dot{E}_{k_2} = (\dot{I}_{c_2} - \dot{I}_{c_1})Z_{c_2} - 2\dot{I}_{k_2} Z_{k_2}, \ldots,$$

$$\dot{E}_{k_{z2}} = (\dot{I}_{c_{z2}} - \dot{I}_{c_{z2-1}})Z_{c_{z2-1}} - 2\dot{I}_{k_1} Z_{k_{z2-1}}.$$

С учетом уравнений (1.2) для контуров, образованных стержнями с одинаковыми сопротивлениями, уравнения примут вид

$$\Delta\dot{I}_{\kappa i+2} - (2+\sigma)\Delta\dot{I}_{\kappa i+1} + \Delta\dot{I}_{\kappa i} = 0,$$

где $\sigma = 2Z_k / Z_c$.

Дополнительные токи, возникшие вследствие несимметрии, в элементах кольца и стержнях до поврежденного стержня

$$\Delta\dot{I}_{ki} = C_1\alpha_{1i} + C_2\alpha_{2i},\ \Delta\dot{I}_{ci} = C_1\alpha_{1(i-1)}(\alpha_1 - 1) + C_2\alpha_{2(i-1)}(\alpha_2 - 1),$$

где $\alpha = 0{,}5((2+\sigma) \pm (\sigma(\sigma+4))^{0{,}5}$;

C_1, C_2 – постоянные коэффициенты, определяемые из граничных условий.

Дополнительные токи в элементах кольца и стержнях после поврежденного стержня

$$\Delta\dot{I}_{ki} = C_3\alpha_{1i} + C_4\alpha_{2i},\ \Delta\dot{I}_{ci} = C_1\alpha_{1(i-1)}(\alpha_1 - 1) + C_2\alpha_{2(i-1)}(\alpha_2 - 1),$$

где C_3, C_4 – постоянные коэффициенты, определяемые из граничных условий.

Дополнительный ток в поврежденном стержне, например в третьем

$$\Delta\dot{I}_{c3} = (C_3 - C_1\alpha_1^{-1})\alpha_{1(3)} + (C_4 - C_2\alpha_2^{-1})\alpha_{2(3)}.$$

Таким образом, для вычисления каждой из дополнительных составляющих необходимо решить систему линейных уравнений с постоянными коэффициентами четвертого порядка.

Преимуществом этой методики является учет несимметрии сопротивлений стержней и участков короткозамыкающего кольца введением дополнительных сопротивлений ΔZ.

В отличие от работы [43] этот метод рассматривает как частный случай обрыв одного или нескольких стержней ротора, а также особенности расчета магнитной индукции и магнитодвижущей силы ротора, вызванные дискретным расположением стержней в пазах. Амплитуду индукции результирующего поля в зазоре можно определить, если заданы напряжение фазы статора, характеристика холостого хода, зависимость магнитодвижущей сила ротора от индукции и полное сопротивление обмотки статора. При этом магнитодвижущая сила ротора также представляется в виде суммы основной и дополнительных составляющих.

При наличии нескольких поврежденных стержней предлагается решать задачу методом наложения и учитывать результирующие токи как сумму токов в симметричной клетке и дополнительных токов от каждого поврежденного стержня. Количество дополнительных составляющих тока должно быть равно числу поврежденных стержней или участков короткозамыкающего кольца, но в данной статье такая задача не решалась. Также при этом не учитывается влияние изменения сопротивлений всех дефектов стержней.

В изложенном методе говорится о возможности его использования для расчёта тока в клетке ротора при несимметрии сопротивлений одного или нескольких участков короткозамыкающего кольца, но подробно такое условие не рассматривалось.

В работе [45] более подробно рассматривается случай распределения токов при дефектах у нескольких стержней. При повреждении стержней с номерами p, q, s сопротивления в них будут отличаться на $\Delta Z_p, \Delta Z_q, \Delta Z_s$. Результирующие токи в стержнях будут равны

$$\dot{I}_{ci} = \dot{I}_c + \Delta\dot{I}_{cp} + \Delta\dot{I}_{cq} + \Delta\dot{I}_{cs}$$

где $\dot{I}_c$ – ток стержня в симметричной обмотке ротора,

$\Delta\dot{I}_{cp}, \Delta\dot{I}_{cq}, \Delta\dot{I}_{cs}$ – добавочные токи, обусловленные дефектами в поврежденных стержнях.

При этом считается, что под влиянием дефектов стержней взаимные добавочные токи в них уменьшаются. Чтобы учесть это

влияние, сумма взаимных добавочных токов рассматривается как исходный ток данного дефектного стержня и, по методике [43], определяется собственный добавочный ток $\Delta_{p(p)} \sum_{i=q,s} \Delta \dot{I}_{cpi}$ и взаимные добавочные токи от этого стержня. Таким образом, ток в третьем дефектном стержне будет равен сумме токов от последовательных итераций

$$\dot{I}_{c3} = \dot{I}_{c3} + \Delta \dot{I}_{c3(3)} + \sum_{i=q,s}^{I} \Delta \dot{I}_{c3i} + \Delta_{3(3)} \sum_{i=q,s}^{I} \Delta \dot{I}_{c3i} + \sum_{i=q,s}^{II} \Delta \dot{I}_{c3i} + \Delta_{3(3)} \sum_{i=q,s}^{II} \Delta \dot{I}_{c3i} \ldots$$

В случае полного обрыва стержня сумма собственного добавочного тока с вызвавшим ее предыдущим током обращается в нуль.

Использование данной методики дает высокую точность при определении значений токов в несимметричной клетке ротора, однако результат зависит от значения коэффициента σ. При этом точное определение величины изменения сопротивлений дефектных стержней без демонтажа двигателя не представляется возможным.

1.4 Способы диагностирования повреждений короткозамкнутого ротора

Как известно, повреждения "беличьей клетки" ротора сводятся к обрывам стержней и разрывам короткозамыкающих колец [46]. При этом требуется определить место возникновения дефекта, идентифицировать вид и оценить степень его развития.

Основная задача диагностики обмоток ротора АД – обнаружить дефект на ранней стадии его развития, когда он еще не оказывает существенного воздействия на работоспособность механизма и не допустить катастрофического развития дефекта.

Из практики эксплуатации АД известно, что при повреждении обмотки ротора появляется несимметрия магнитодвижущей силы обмотки ротора. Вследствие этого возникает пульсация фазного тока статора и его активной составляющей при пуске АД, снижение электромагнитного момента и коэффициента мощности, а также увеличение вибрации и расхода электроэнергии пульсация фазных токов статора, колебание частоты вращения, вибрация и др. Поэтому, изменение этих параметров может служить информационными признаками при диагностировании обмотки ротора АД.

Существующие в настоящее время способы диагностики состояния роторных обмоток можно разделить на две большие группы: методы тестовой и функциональной диагностики. При использовании методов тестовой диагностики формируются искусственные возмущения и по степени их искажения судят о состоянии двигателя. Такие методы строятся на базе простых информационных технологий и широко используются для диагностирования на этапе изготовления или на неработающих двигателях.

Ко второй группе относятся методы функциональной диагностики, когда вся необходимая информация извлекается из сигналов, измеренных в процессе обычной работы двигателей. Эти методы основаны на прямых или косвенных измерениях и анализе определенных физических параметров в элементах конструкции работающего электродвигателя или окружающих его физических полей.

Так в [47] предлагается измерять пульсации фазного тока во время пуска АД. Сущность метода заключается в сравнении каждого предыдущего амплитудного значения тока фазы с последующим и при определенной разности этих величин можно определить наличие дефектов в обмотке ротора. На основе этого предприятием Сибтехэнерго [48] разработано устройство для выявления обрывов роторных стержней асинхронных электродвигателей «ВОРС» и предложена методика диагностики состояния обмоток асинхронных электродвигателей, использующая любой, предусмотренный в эксплуатации пуск агрегата, посредством анализа пускового тока в одной из фаз двигателя вторичной цепи тока ротора. Подключение устройства к АД осуществляется при помощи разъемной клещевой приставки в цепь вторичной обмотки трансформатора тока, установленного на кабеле. Для этого используется клещевая приставка от ВАФ-85М. По [48] устройство «ВОРС» позволяет выявить обрыв одного и более стержней ротора асинхронных электродвигателей. Недостатком устройства является невозможность диагностирования АД с малым временем пуска, так как в этом случае величина биений незначительно отличается от разности амплитуд за один период в неповрежденном АД.

Этого недостатка лишен метод диагностирования [50], при котором АД питают пониженным напряжением, а замеры изменения фазного тока осуществляют в процессе медленного поворота ротора. Однако этот способ сложен при реализации на мощных высоковольтных машинах.

Исследование в [51] показало, что наиболее информативным признаком, характеризующим повреждение «беличьей клетки» является результирующий вектор тока статора, модуль которого определяют как

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}(i_{sA}^2 + i_{sB}^2 + i_{sC}^2)}.$$

где i_{sA}, i_{sB}, i_{sC} – мгновенные значения токов фаз статора.

На основе этого был разработан способ контроля исправности стержней ротора АД, при котором на контролируемый АД подается пониженное напряжение, а величина потребляемого тока сравнивается с током неповрежденного АД. В качестве информационного признака может быть также использована активная мощность двигателя, измеренная, например датчиком Холла. Сведений о чувствительности устройств, выполненных по этому способу, не приведено.

По результатам моделирования в работе [52] сделан вывод, что достоверным признаком обрыва стержней ротора АД с короткозамкнутым ротором может служить наличие пульсаций в результирующем векторе тока статора, активной мощности, скольжения и сопротивления двигателя.

В [35] предложен способ проверки исправности стержней на заторможенном роторе АД, который частично выдвинут из сердечника статора. Он основан на измерении магнитного потока рассеяния вокруг стержней по окружности ротора. Повреждение стержня определяется по дребезжанию стальной пластинки, поочередно накладываемой на каждый паз выступающей из статора части ротора. При этом АД питается напряжением 20-25% от номинального.

Предложенный в [53] способ определения обрыва стержней ротора основан на измерении колебаний тока фазы статора с учетом частоты скольжения ротора. Однако эти пульсации малы по величине и напрямую зависят от скорости вращения ротора. В результате требуется постоянная подстройка контура выделения сигнала.

Специалистами Центра электромагнитной безопасности разработан аппаратно-программный комплекс [54] для выполнения работ по аудиту состояния и условий работы электрической и механической части электродвигателей. Его принцип действия основан на спектральном анализе потребляемого двигателем тока.

При наличии повреждений в спектре тока появляются токи с характерными частотами. В этом случае информационным признаком повреждения ротора является наличие двух симметричных относительно частоты питающей сети пиков в спектре тока.

В [55, 56] делается попытка доказать, что наиболее информативным признаком неисправности «беличьей клетки» ротора АД является пульсация третьей гармоники. Здесь же предлагается выявлять пульсации третьей гармоники фазного тока статора в режиме нагрузки машины с помощью специальных анализаторов спектра. Что позволяет отстроиться от других гармонических составляющих. Однако это техническое решение пригодно только для АД с соединением обмотки статора в треугольник.

Значительный вклад в развитие теории построения устройств диагностики повреждения «беличьей клетки» внесли Kliman [57], Thomson [58], Filippetti [59], Elkasabgy [60]. Для обнаружения повреждений стержней в этих работах также использовался анализ спектра фазного тока АД. В этих работах было показано, что повреждение «беличьей клетки» вызывает появление у основной гармонической сети f_1, боковых гармонических с частотой

$$f_b = f_1(1 \pm 2s). \qquad (1.4)$$

При этом считается, что низкая боковая полоса возникает из-за повреждения стержней, а верхняя боковая полоса - из-за колебаний скорости вращения ротора. В [59] утверждается, что повреждение стержней вызывают целый ряд таких боковых полос, частоту которых можно определять из выражения

$$f_b = f_1(1 \pm 2ks), \qquad (1.5)$$

где k=1,2,3…

Однако повреждение стержней приводит к появлению и других спектральных составляющих. Так в соответствии с [57] и [61] в фазном токе статора могут быть наблюдаться боковые гармонические с частотами

$$f_b = f_1\left[\left(\frac{k}{p}\right)(1 - s) \pm s\right], \qquad (1.6)$$

где k/p=1,3,5...

В [59] сделано предположение, что повреждения стержней можно обнаружить путем спектрального анализа напряжений, индуцируемых в индукционных преобразователях, размещаемых внутри АД на зубцах статора или снаружи на корпусе двигателя. В качестве измеряемого параметра следует выбирать напряжения с частотами, которые рассчитывают по (1.6) при $k=1$.

В электрической машине с блоком контроля внутренних повреждений обмоток [19] индукционные преобразователи наматывают на ферромагнитные вставки клиньев и соединяют таким образом, что при симметричном режиме работы напряжение на их выходе равно нулю. При появлении любой несимметрии, например, вызванной обрывом стержней, это напряжение не равно нулю. В то же время о возможностях этого технического решения по выявлению поврежденных стержней ничего не известно.

В АД [15] встроенный блок системы диагностики выполнен в виде измерительной обмотки, а последняя из двух включенных встречно - последовательно катушек. Первая катушка намотана с шагом $3q$, а вторая – с шагом q, где q – число пазов на полюс и фазу. Вторая катушка имеет в два раза больше витков чем первая. ЭДС любой из гармонических на выходе измерительной обмотки появляется только при обрыве одной фазы статора и обрыве стержня «беличьей клетки». О его реализации и чувствительности данных нет.

Повысить чувствительность такой системы диагностики можно за счет выполнения измерительной обмотки из n числа катушек [16]. Число катушек определено числом пазов статора и ротора, числом пазов на полюс и фазу, а также числом пар полюсов основной обмотки и рассчитывается по приведенным в [16] формулам. Повышение чувствительности в сравнении с [15] достигается за счет компенсации высших гармонических, которые имеют число пар полюсов в нечетное число раз больше, чем число пар полюсов основной гармоники.

С той же чувствительностью, но более простую систему диагностики обрыва стержня [17] можно получить, если преобразователь выполнить в виде трех катушек с шагом в два зубцовых деления и равномерно разнесенных вдоль воздушного зазора. О его реализации также данных нет.

Работа устройства диагностики повреждения стержней короткозамкнутого ротора АД [20] основана на измерении в воздушном зазоре импульсов магнитного поля от тока целых стержней и сравнения результатов счета с общим числом стержней конкретного АД. Для измерения используют индукционный

преобразователь, который помещают в воздушный зазор вблизи стержней ротора.

В работах [59, 60] предполагается, что информационным признаком при повреждении стержня в роторе может служить вращающий момент АД. Точнее его гармонические составляющие с частотами $2sf_1$ и $4sf_1$.

В своей работе [62] Penman предлагает для обнаружения такого вида повреждений измерять аксиальную составляющую магнитного потока вала с помощью внешнего индукционного преобразователя. Частоты напряжения для измерения повреждения рассчитывают также по (1.6) с k=1,2,3.

В устройстве [63] обрыв стержня ротора обнаруживают по появлению фазной несимметрии в АД. Для чего используют индукционный преобразователь с ферромагнитным сердечником. Он устанавливается на торце вала ротора АД. Реализация этого устройства очень сложна, в то же время ничего не известно о его чувствительности.

На измерении аксиальной составляющей магнитного потока вала, появляющегося при возникновении магнитной несимметрии АД за счет обрыва стержней ротора, эксцентриситета и т.д., основана работа системы диагностики [12], которая также имеет внешний измерительный преобразователь съемного типа. Повреждение определяется по результатам замера одной из четырех частот не указанных в [12].

В [10] исследовано распределение внешнего магнитного мультиполя АД и доказано, что обрыв стержня ротора приводит к появлению в нем магнитного диполя. Это явление использовано на заводе «Электротяжмаш» для создания испытательного стенда. Устройство позволяет контролировать качество заливки роторов стиральных машин массового производства. Контроль осуществляется в режиме холостого хода.

Диагностические комплексы фирмы ВАСТ (Россия, Санкт-Петербург) используют метод диагностирования по вибрации. Так способ [64] основан на измерении сигналов вибрации корпуса АД в диапазонах частот, кратных частоте вращения ротора. Ширина этих диапазонов равна двойной частоте скольжения ротора. При сравнении уровня дискретных составляющих сигнала, кратных частоте вращения ротора и двойной вращения ротора с пороговым сигналом, судят о наличии дефекта. Однако применение вибросигнала для диагностики требует применения специальной виброаккустической аппаратуры.

Анализ рассмотренных методов диагностики позволяет сформулировать следующее:

а) Потенциальные возможности диагностических систем определяются выбором диагностического сигнала. Он должен содержать достаточную диагностическую информацию для того, чтобы с помощью современных информационных технологий обнаружить дефектный узел машины, определить вид и глубину дефекта и дать прогноз его развития.

б) Наиболее эффективны технические средства диагностики стационарные и переносные, выполненные на базе персонального компьютера. С их помощью можно получать информацию на основе таких перспективных методов как спектральный анализ, статистическое распознавание состояний. Анализ тенденций развития средств измерения, анализа и передачи информации, а также средств вычислительной техники показывает, что в ближайшее время широкое распространение получат малогабаритные устройства диагностики с встроенным микрокомпьютером.

в) Компьютерные диагностические устройства используются совместно с устройствами преобразования диагностических сигналов в цифровую форму и ввода их в оперативную память компьютера. В качестве указанных устройств можно применять профессиональные звуковые карты с небольшой доработкой. Также могут использоваться специальные входные устройства и соответствующее программное обеспечение к ним.

г) Стационарные системы диагностики ориентированы на непрерывный контроль диагностических параметров конкретной машины и имеют специальные режимы адаптации на начальном этапе эксплуатации. На этом этапе определяют влияние режимов работы и изменения внешних условий, что снижает вероятность ложного срабатывания. Переносные системы диагностики эффективно используют одноразовое измерение диагностических параметров и могут использоваться в «полевых» условиях. Глубина диагноза, обеспечиваемая ими, обычно невелика и требует дальнейших исследований по идентификации повреждений.

1.5 Методы гармонического анализа электрических сигналов индукционных преобразователей

Более широкими возможностями при решении задачи получения информации о протекании процессов в АД с требуемой точностью располагают методы диагностики, основанные на мониторинге

электрического сигнала индукционного преобразователя с последующим его спектральным анализом [65–70].

Обработка аналоговых и цифровых сигналов может выполняться аналоговым или дискретным (цифровым) методами. Аналоговая обработка заключается в осуществлении преобразований напряжений и токов с помощью различных электротехнических элементов. Такой метод обработки обладает большим быстродействием и дает результат в непрерывной аналоговой форме.

При цифровой обработке сигналы представляются цифровыми кодами, поэтому результат может быть получен для дискретных моментов времени.

Процесс цифровой обработки состоит из последовательного выполнения большого числа тех или иных операций, что не способствует достижению высокого быстродействия. Такой способ обработки сигнала по сравнению с аналоговым, обеспечивает более высокую точность, помехозащищенность и стабильность [71], а также позволяет выполнять новые, более сложные, виды обработки.

Одной из основных операций обработки электрического сигнала индукционного преобразователя является спектральный анализ.

Анализ периодических сигналов сложной формы нередко осуществляют путем разложения его на гармонические составляющие в ряд Фурье. В виде ряда Фурье можно представить любую функцию, удовлетворяющую условию периодичности

$$x(t) = x(t+T), \qquad (1.7)$$

где t – текущее время;

T – длительность периода функции.

А также условиям Дирихле, по которым функция должна быть ограниченной, кусочно-непрерывной и иметь на протяжении периода конечное число экстремумов или разрывов [72].

В тригонометрической форме ряд Фурье обычно представляют в виде

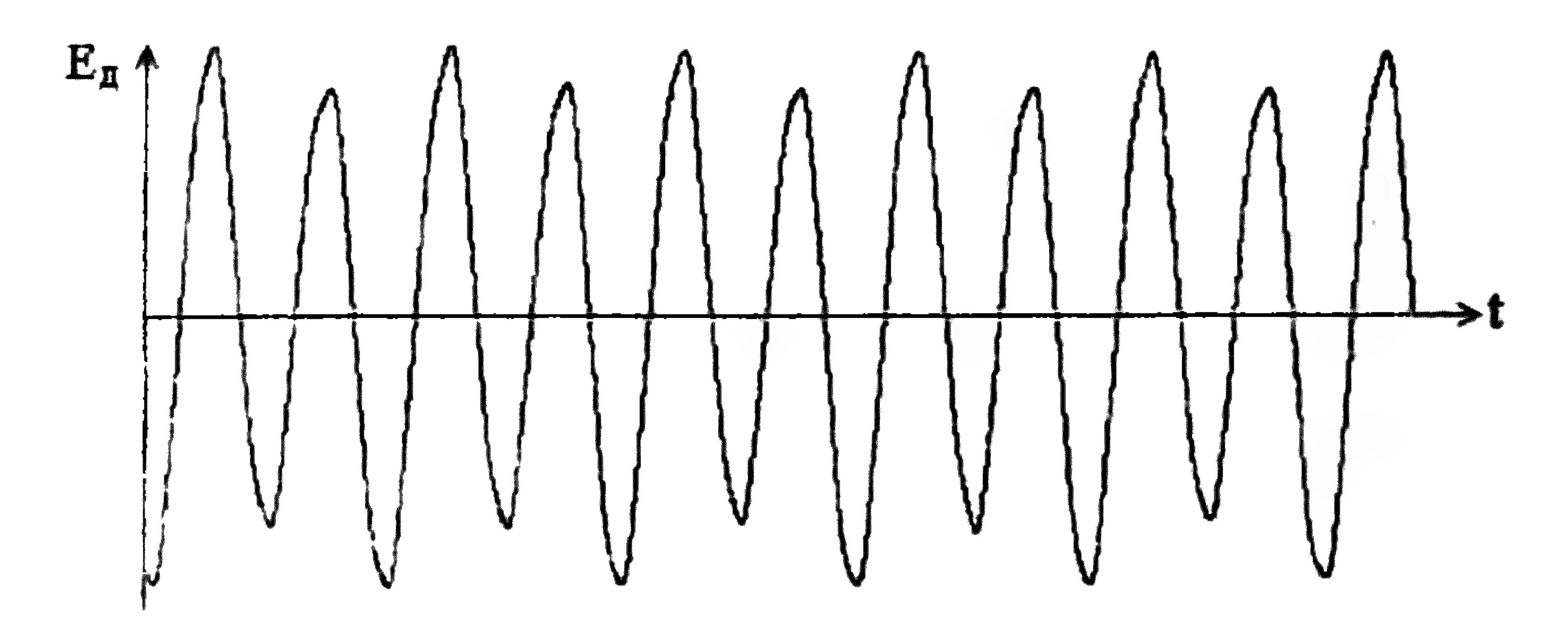
$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{\nu=1}^{\infty} a_\nu \cos(\nu\omega t) + \sum_{\nu=1}^{\infty} b_\nu \sin(\nu\omega t). \qquad (1.8)$$

В этом случае коэффициенты ряда Фурье определяют как

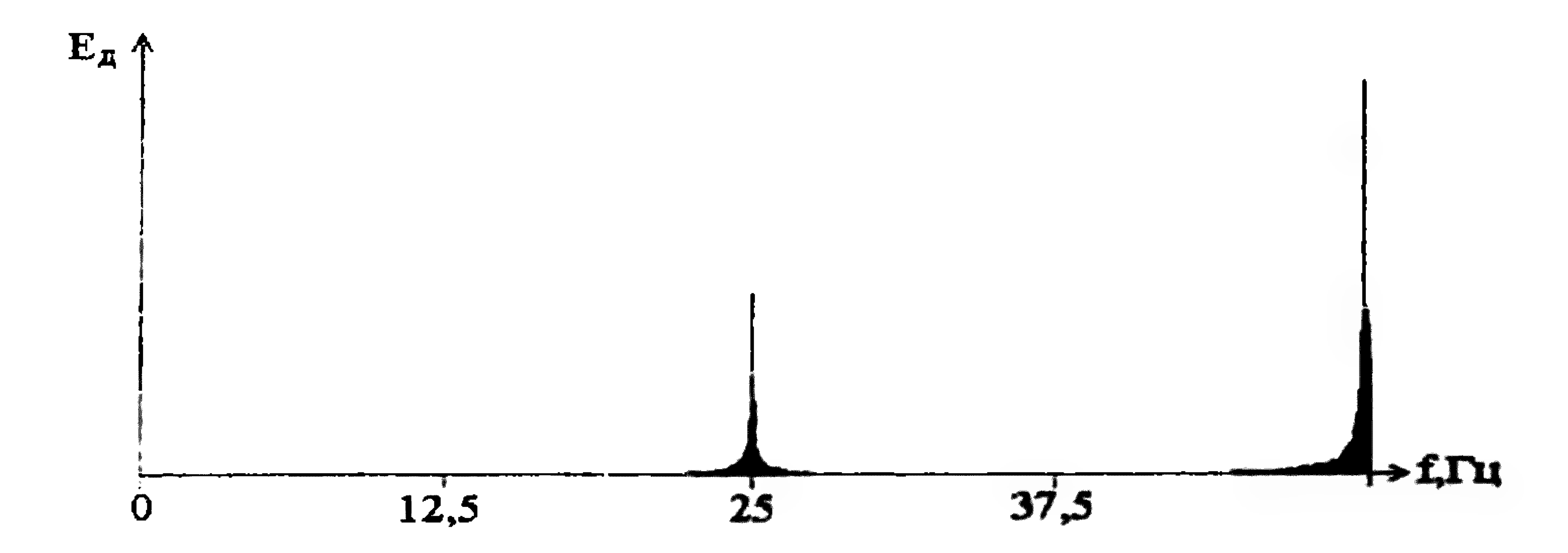
$$a_0 = \frac{1}{T_0}\int_t^{t+T_0} x(t)dt\ ,\quad a_\nu = \frac{2}{T_0}\int_t^{t+T_0} x(t)\cos\,\nu\omega_0 t dt\ ,$$

$$b_\nu = \frac{2}{T_0}\int_t^{t+T_0} x(t)\sin\,\nu\omega_0 t dt\ . \qquad (1.9)$$

С помощью этих коэффициентов определяется амплитуда произвольной гармоники. Таким образом, электрический сигнал в виде временной зависимости, показанной на рисунке 1.11,а, может быть представлен в виде спектра гармонических с различными частотами (рисунок 1.11,б). При этом спектр и амплитуда гармоник зависят от длительности периода разложения.



а) временная зависимость



б) спектр гармонических с различными частотами

Рисунок 1.11 – Способы представления электрического сигнала

Физическая сущность коэффициентов ряда Фурье заключается в отражении амплитуд и начальных фаз отдельных гармонических составляющих, входящих в состав сложного периодического колебания.

Полный ряд Фурье содержит бесконечное число членов. Однако основная часть энергии реальных электрических колебаний передается в ограниченном диапазоне частот, то есть конечным числом гармоник [71–74]. В большей своей части коэффициенты полного ряда Фурье пренебрежимо малы на фоне конечного числа реально значимых коэффициентов. Это позволяет использовать при описании реальных колебаний конечные ряды Фурье.

После аналого-цифрового преобразования непрерывный сигнал представляется совокупностью его мгновенных значений - выборок. Принципиально аналого-цифровое преобразование может выполняться как с постоянным интервалом между выборками, так и с фиксированным числом выборок N на каждом периоде преобразуемого колебания T. С точки зрения обработки информации используемый способ дискретизации имеет существенное значение.

При фиксированном числе выборок N на периоде сигнала T для вычисления коэффициентов ряда Фурье можно использовать следующие алгоритмы

$$a_0 = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x_n, \quad a_\nu = \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x_n \cos(2\pi \frac{n}{N}\nu),$$

$$b_\nu = \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x_n \sin(2\pi \frac{n}{N}\nu), \qquad (1.10)$$

где n - номер выборки из сигнала в пределах периода.

Дискретное преобразование Фурье или быстрое преобразование Фурье, широко применяется в системах цифровой обработки информации. При вычислении коэффициентов ряда Фурье по алгоритмам (1.9) и (1.10) требуется выполнить $(N-1)^2 \approx N^2$ операций умножения и $N(N-1) \approx N^2$ операций сложения. Это приводит к тому, что с ростом N резко увеличивается объем вычислений. В настоящее время во многих цифровых устройствах широко применяется алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). Идея быстрого преобразования заключается в рекуррентном

применении основополагающих выражений дискретного преобразования Фурье к анализируемому сигналу. Существуют различные алгоритмы БПФ, отличающиеся друг от друга способами разделения выборок на подгруппы и требованиями, предъявляемыми к числу одновременно обрабатываемых выборок. Особенно эффективным БПФ становится при условии

$$N = 2^s,$$

где s – целое число [73].

При этом число выполняемых операций умножения уменьшается до $N \log_2 N$ вместо N^2.

Гармонический анализ также можно осуществлять с помощью интеграла Фурье. Представление временной функции рядом Фурье справедливо только в тех случаях, когда функция наблюдается в бесконечных пределах. Наблюдение реального сигнала всегда ограничено во времени. По своей сути конечные во времени сигналы – непериодические. Однако финитный сигнал можно рассматривать как частный случай периодического сигнала с периодом $T \to \infty$ [74]. При беспредельном возрастании T разности между частотами соседних гармоник ряда Фурье и сама частота основной гармоники будут стремиться к нулю, обращаясь в дифференциал. Соответственно, дискретное множество значений частот переходит в непрерывно изменяющуюся частоту ω, а сумма гармоник – в интеграл по этой частоте

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt. \tag{1.11}$$

Обратный переход от спектральной характеристики к временной функции выполняется в соответствии со следующим выражением

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} F(j\omega) d\omega. \tag{1.12}$$

Выражение 1.12 называют прямым преобразованием Фурье. Оно позволяет по заданной функции $x(t)$ найти ее спектральную характеристику $F(j\omega)$. Обратное преобразование Фурье дает

возможность по спектру $F(j\omega)$ определить функцию $x(t)$. В отношении прямого преобразования на функцию $x(t)$ накладывается ограничение: чтобы интеграл имел определенное конечное значение, функция $x(t)$ должна не только удовлетворять условию Дирихле, но и быть абсолютно интегрируемой в пределах от $-\infty$ до $+\infty$. Это значит, что $x(t)$ должна стремиться к нулю при $t \to -\infty$ и $t \to \infty$.

Преобразование Фурье в интегральной форме представляет интерес в первую очередь для анализа сигналов и процессов в целом.

Гармонический анализ широко применяется в электротехнике как основное средство анализа линейных систем. Однако разложение сложных функций на гармонические составляющие не является единично возможным, существует способ разложения сигналов на прямоугольные функции, в частности функции Уолша. Кроме функций Уолша известны прямоугольные функции, например Радемахера, Адамари и Пэли [72].

Приведенный обзор методов разложения электрических сигналов индукционных преобразователей на составляющие показывает, что при их анализе предпочтение следует отдать быстрому преобразованию Фурье.

В последнее время в связи с всеобщей «компьютеризацией» значительно возрос интерес к измерительной аппаратуре на базе ЦАП-АЦП и использующей в качестве устройства управления и отображения ПК. ПК широко распространены и предоставляют возможность создания гибкой, мобильной и недорогой диагностической системы, пригодной для решения широкого круга задач, в частности для диагностирования повреждения ротора АД.

В данной работе для исследования электрического сигнала на выходе ТИП использовался ПК, оснащенный специальным программным обеспечением «ЛАРИСА», разработанным в среде Delphi сотрудниками кафедры «Автоматизация и управление» Павлодарского государственного университета. В качестве блока аналого-цифрового преобразования используется АЦП звуковой карты, основой которого является сигнальный процессор DSP, выполняющий цифровую фильтрацию и векторизацию входных сигналов. На рисунке 1.12 показано командное окно программы.

Это окно является основным. В нем отображаются временные диаграммы. В верхней части окна размещена строка меню, имеющая вкладки для обработки графиков. Программа позволяет записывать и сохранять сигналы длительностью до 30 мин, выполнять их преобразование и обработку.

Рисунок 1.12 – Основное окно программы

Вкладка «Расчет», показанная на рисунке 1.13, позволяет выполнять разложение в ряд Фурье с заданными параметрами.

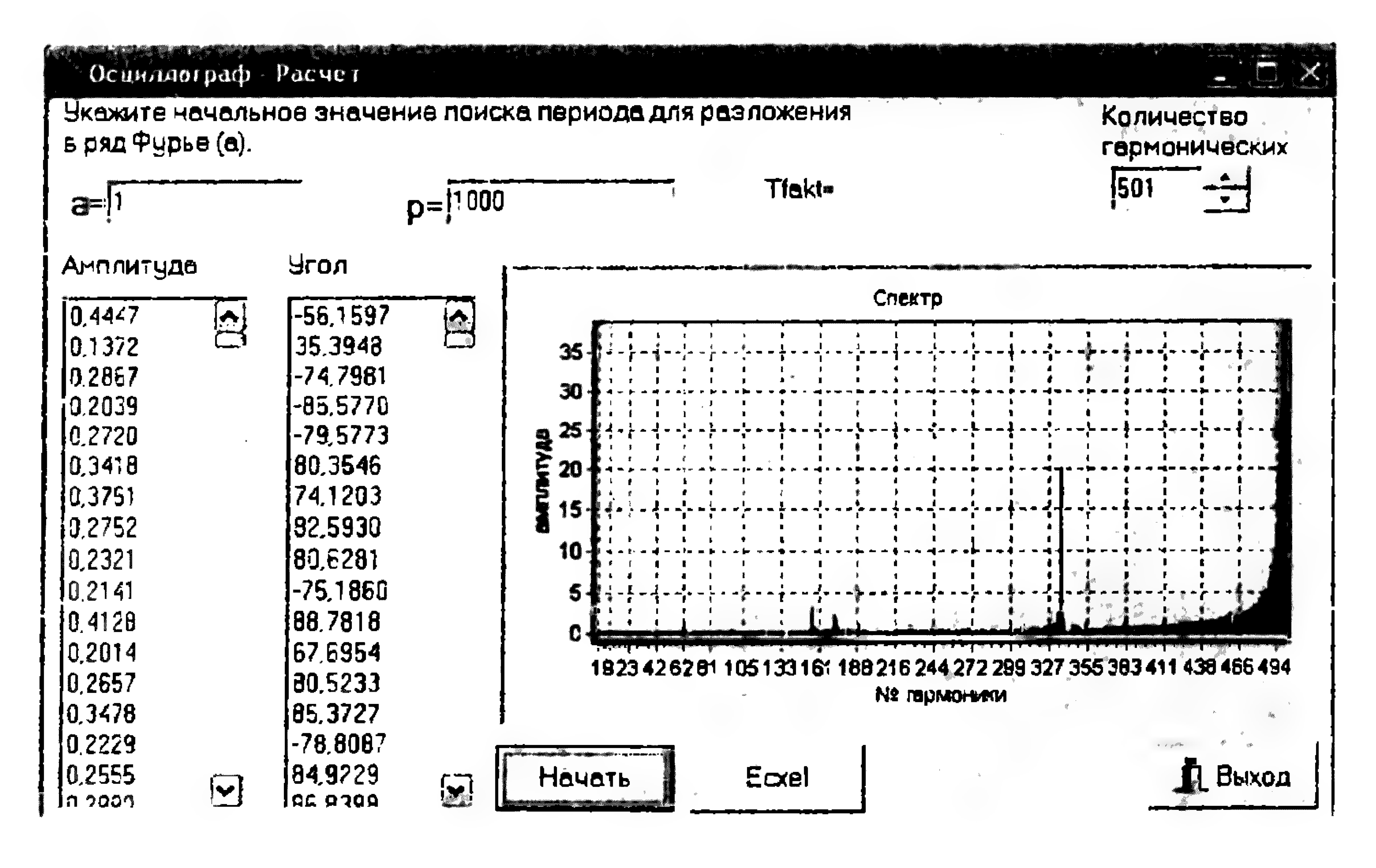


Рисунок 1.13 – Окно вкладки «Расчет»

1.6 Выводы

а) Анализ конструкционных особенностей и возможностей индукционных преобразователей показал, что для диагностики обмоток ротора АД наиболее целесообразно использовать ТИП. При этом для стационарных устройств диагностики следует использовать ТИП внутренней установки, а для переносных – П - образные ТИП внешней установки.

б) Эксплуатация АД даже с одним поврежденным стержнем «беличьей клетки» ротора приводит к увеличению потребления электроэнергии, причем стоимость потребленной дополнительно электроэнергии за год сопоставима со стоимостью самого двигателя.

в) Токи ротора с обрывом стержней следует представлять в виде суммы их до аварийного значения и добавочных токов.

г) Известные методы определения добавочных токов в основном предназначены для определения их при обрыве только одного стержня обмотки ротора, а недостатком остальных является большое количество итераций и громоздкие уравнения, решение которых нередко приводит недопустимому снижению точности моделирования.

д) В качестве информационного признака наиболее перспективны гармонические f_b, являющиеся боковыми основной гармоники, которые следует выделять с помощью ТИП из магнитных полей лобового рассеяния, вала ротора и торцевого щита.

е) Обработку аналогового сигнала ТИП с целью повышения точности, помехозащищенности и стабильности результата следует осуществлять методом дискретного преобразования Фурье (быстрого преобразование Фурье).

2 Теоретические основы построения систем диагностики

2.1 Метод формирования системы уравнений математической модели асинхронного двигателя

АД с короткозамкнутым ротором в собственных нуждах (СН) электрических станций и на производстве работает в естественных эксплуатационных режимах работы [75]. К ним относят пуск, самозапуск, динамическое торможение и нагрузочные режимы. В связи с использованием в системе диагностики метода быстрого разложения Фурье, диагностирование АД возможно только в произвольном нагрузочном режиме. Причем режим должен быть установившимся. Это вызвано тем, что для получения разрешения по частоте в 0,1 Гц длительность измерения сигнала составляет не менее 10 с. В то же время, адекватность модели АД проверяют в переходных режимах.

Переходные процессы эксплуатационного характера в АД возникают при переходе от одного установившегося режима к другому вследствие эксплуатационных переключений или при изменении напряжения электрической сети и внешнего вращающего момента, приложенного к валу.

При переходных процессах в обмотках АД могут появляться токи, во много раз превосходящие номинальные, в результате электромагнитный момент вращения и электромагнитные силы также могут быть во много раз больше, чем в номинальном режиме. Поэтому при моделировании токов в обмотках статора и ротора необходимо учитывать возможные изменения энергии магнитных полей и кинетической энергии вращающихся частей.

При коммутационных переключениях частота вращения двигателя практически постоянна и переходные процессы считаются электромагнитными. Электромеханические переходные процессы обусловлены быстрыми изменениями частоты вращения АД. Скорость затухания электромагнитных переходных процессов зависит в основном от параметров обмоток, а механических переходных процессов – от моментов инерции вращающихся масс и величины нагрузки.

Постоянные времени электромагнитных переходных процессов в некоторых случаях значительно меньше постоянных времени затухания механических процессов, тогда они оказывают малое влияние друг на друга и расчет механических процессов производят по статическим пусковым характеристикам. Но часто они оказываются соизмеримыми, и в этом случае, рассматриваются

электромеханические переходные процессы с учетом взаимного влияния электромагнитных и механических параметров асинхронного двигателя.

При исследовании переходных процессов выбираемая форма записи уравнений должна обеспечить наибольшую простоту, но при этом необходимо учитывать такие факторы, как нелинейность кривой намагничивания, зависимость параметров АД от нагрузки, взаимное влияние электромагнитных и механических процессов.

Наиболее полно процесс преобразования энергии в АД в переходных и стационарных процессах описывает математическая модель с фазовыми координатами [1, 39].

Систему уравнений напряжений для такой математической модели [1, 39] АД с короткозамкнутым ротором с учетом рисунка 2.1 обычно представляют в виде

$$\left.\begin{aligned} u_A &= R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt}; & 0 &= R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ u_B &= R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt}; & 0 &= R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ u_C &= R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt}; & 0 &= R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}, \end{aligned}\right\} \qquad (2.1)$$

и дополняют уравнением движения вращающихся частей

$$J\frac{d\omega_2}{dt} = M_э + M_c, \qquad (2.2)$$

где u_i, i_i – мгновенные фазные напряжения и токи обмоток статора и ротора ($i = A, B, C, a, b, c$);

R_i – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора;

ψ_i – результирующие потокосцепления фаз.

Потокосцепления с фазами обмоток статора и ротора по [1, 39] выражаются через токи фаз и соответствующие индуктивности. Например, для фаз A и a статора и ротора

$$\begin{aligned} \psi_A &= i_A L_A + i_B L_{AB} + i_C L_{AC} + i_a L_{Aa} + i_b L_{Ab} + i_c L_{Ac}, \\ \psi_a &= i_A L_{Aa} + i_B L_{Ba} + i_C L_{Ca} + i_a L_a + i_b L_{ab} + i_c L_{ac}. \end{aligned} \qquad (2.3)$$

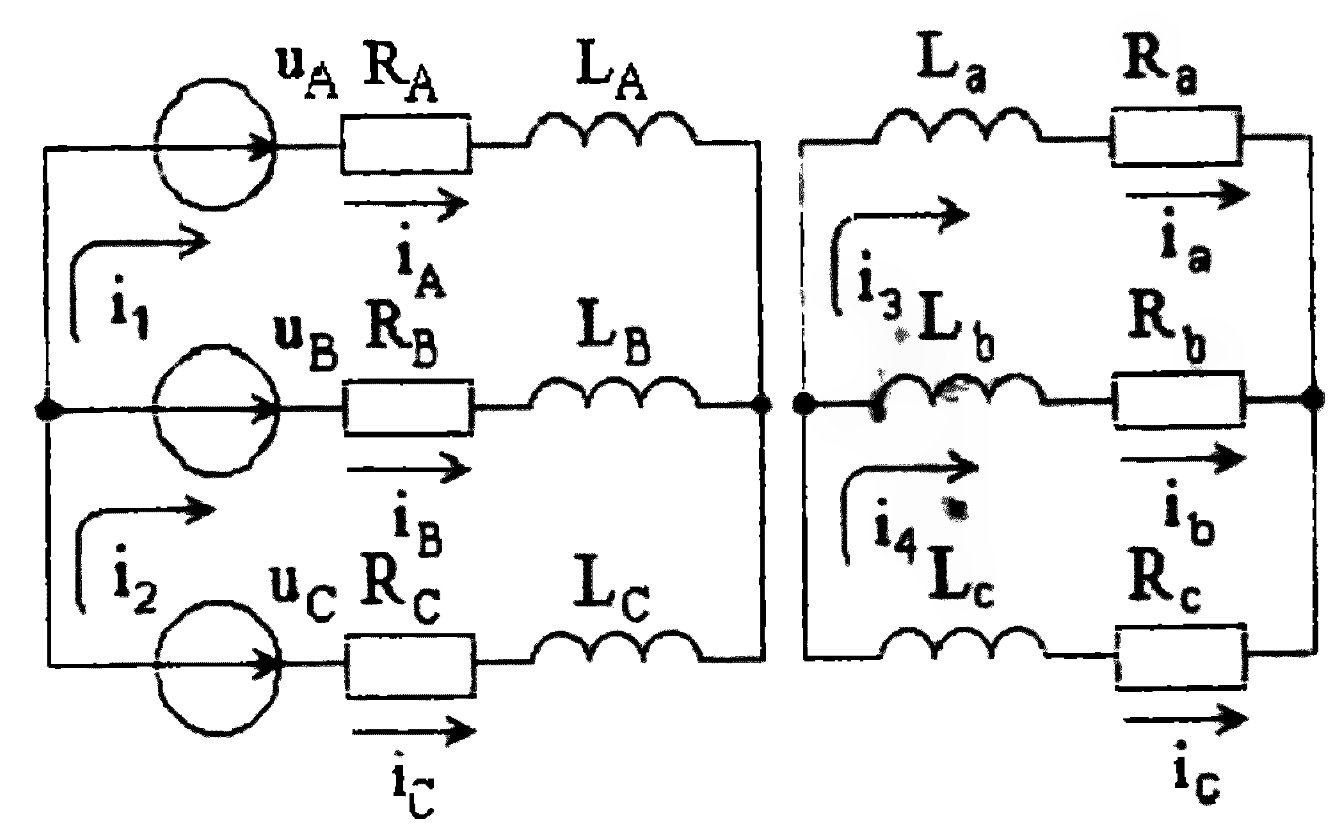


Рисунок 2.1 – Распределение токов в обмотках АД

Если магнитная цепь не насыщена, то собственные индуктивности фаз

$$L_A = L_{Am} + L_{A\delta},\ L_B = L_{Bm} + L_{B\delta},\ L_C = L_{Cm} + L_{C\delta},$$
$$L_a = L_{am} + L_{a\delta},\ L_b = L_{bm} + L_{b\delta},\ L_c = L_{cm} + L_{c\delta}, \qquad (2.4)$$

а их взаимные индуктивности между фазами статора и ротора

$$L_{AB} = L_{ABm} + L_{AB\delta},\ L_{BC} = L_{BCm} + L_{BC\delta},\ L_{CA} = L_{CAm} + L_{CA\delta},$$
$$L_{ab} = L_{abm} + L_{ab\delta},\ L_{bc} = L_{bcm} + L_{bc\delta},\ L_{ca} = L_{cam} + L_{ca\delta}. \qquad (2.5)$$

Высшие гармонические воздушного зазора учитываются только при расчете индуктивностей (2.4) и взаимных индуктивностей (2.5) рассеяния, помеченных индексом δ [1]. Остальные индуктивности и взаимные индуктивности обозначены индексом m. Они связаны только с основной гармонической поля зазора и рассчитываются по формулам для главных и взаимных индуктивностей. В симметричной приведенной машине главные индуктивности всех фаз обмоток одинаковы и не зависят от углового положения ротора

$$L_{Am} = L_{Bm} = L_{Cm} = L_{am} = L_{bm} = L_{cm} = L_m;$$

$$L_m = \frac{4\mu_0}{p\pi^2}(w_1 k_{01})^2 \frac{\tau l_\delta}{\delta k_\delta},$$

где L_m – максимальная приведенная взаимная индуктивность между фазами статора и ротора.

Главные взаимные индуктивности между фазами статора и ротора также равны между собой

$$L_{ABm} = L_{BCm} = L_{CAm} = -L_m/2 \text{ и } L_{abm} = L_{bcm} = L_{cam} = -L_m/2. \quad (2.6)$$

Взаимные индуктивности между фазами статора и ротора зависят от углового положения ротора, определяемого величиной электрического угла γ между осями фаз статора и ротора A и a

$$\begin{aligned} L_{Aa} &= L_{Bb} = L_{Cc} = L_m \cos\alpha_{Aa}, \\ L_{Ab} &= L_{Bc} = L_{Ca} = L_m \cos\alpha_{Ab}, \\ L_{Ac} &= L_{Ba} = L_{Cb} = L_m \cos\alpha_{Ac} \end{aligned} \quad (2.7)$$

где электрические углы между осями фаз статора и ротора имеют значения

$$\alpha_{Aa} = p\gamma, \ \alpha_{Ab} = p\gamma + 2p/3 \text{ и } \alpha_{Ac} = p\gamma + 4p/3.$$

При переходном процессе в математическую модель добавляется уравнение моментов и движения

$$M_э = \sum_{k=1,2} i_k \sum_{n=3,4} i_n \frac{dL_{kn}}{d\alpha_{kn}}, \quad J\frac{d\omega_2}{dt} = M_э + M_c. \quad (2.8)$$

Так как большую часть времени АД эксплуатируется в нагрузочных режимах с равномерной нагрузкой, то возникающие переходные процессы можно считать электромагнитными, а уравнения моментов не учитывать. Поэтому при анализе поведения устройств диагностики в установившихся режимах от дифференциальных уравнений можно перейти к алгебраическим путем замены оператора дифференцирования d/dt на $j\omega$.

Несмотря на несомненные достоинства этой математической модели, ее использование для моделирования работы АД также сопряжено со значительными сложностями. К ним относится большое число уравнений [1] и периодически изменяющиеся во времени коэффициенты. Как показала практика использования математических

моделей для анализа переходных и установившихся процессов в АД на ПЭВМ [76] с приемлемой точностью, число уравнений не должно превышать пяти. Кроме того, моделирование при несимметрии в сети невозможно, если отсутствуют выводы нулевой точки обмотки статора или она соединена в треугольник.

Решить эти проблемы можно, составляя систему дифференциальных уравнений модели для линейных напряжений с использованием метода контурных токов [76]. Составлять уравнения непосредственно по схеме достаточно сложно из-за большого количества магнитосвязанных элементов, поэтому в данной работе предлагается простой метод получения этих уравнений непосредственно из системы уравнений типа (2.1).

Рассмотрим метод формирования системы уравнений такой математической модели на примере трехфазного АД с короткозамкнутым ротором. Уравнения математической модели для междуфазных напряжений u_{AB} и u_{BC} получают из (2.1)–(2.5) путем вычитания соответствующих строк. В результате

$$\left.\begin{aligned} u_{AB} &= i_A R_A - i_B R_B + \frac{d\psi_{AB}}{dt}, \quad 0 = i_a R_a - i_b R_b + \frac{d\psi_{ab}}{dt}, \\ u_{BC} &= i_B R_B - i_C R_C + \frac{d\psi_{BC}}{dt}, \quad 0 = i_b R_b - i_c R_c + \frac{d\psi_{bc}}{dt}. \end{aligned}\right\}, \tag{2.9}$$

где потокосцепления

$$\begin{aligned} \psi_{AB} &= i_A(L_A - L_{AB}) + i_B(L_{AB} - L_B) + i_C(L_{AC} - L_{BC}) + \\ &\quad + i_a(L_{Aa} - L_{Ca}) + i_b(L_{Ab} - L_{Bb}) + i_c(L_{Ac} - L_{Bc}); \\ \psi_{BC} &= i_A(L_{AB} - L_{AC}) + i_B(L_B - L_{BC}) + i_C(L_{BC} - L_C) + \\ &\quad + i_a(L_{Ba} - L_{Ca}) + +i_b(L_{Bb} - L_{Cb}) + i_c(L_{Bc} - L_{Cc}); \\ \psi_{ab} &= i_A(L_A - L_{AB}) + i_B(L_{AB} - L_B) + i_C(L_{AC} - L_{BC}) + \\ &\quad + i_a(L_{Aa} - L_{Ba}) + i_b(L_{Ab} - L_{Bb}) + i_c(L_{Ac} - L_{Bc}); \\ \psi_{bc} &= i_A(L_{AB} - L_{AC}) + i_B(L_B - L_{BC}) + i_C(L_{BC} - L_C) + \\ &\quad + i_a(L_{Ba} - L_{Ca}) + i_b(L_{Bb} - L_{Cb}) + i_c(L_{Bc} - L_{Cc}). \end{aligned}$$

В уравнениях системы (2.9) с учетом рисунка 2.1 легко заменить токи фаз токами контуров. Так как

$$i_A = i_1,\ i_B = i_2 - i_1,\ i_C = -i_2,\ i_a = i_3,\ i_b = i_4 - i_3,\ i_c = -i_4. \quad (2.10)$$

При условии, что междуфазные напряжения в уравнениях короткозамкнутого ротора равны нулю, получим систему из четырех уравнений

$$\left.\begin{aligned} u_{AB} &= i_1(R_A + R_B) - i_2 R_B + \frac{d\psi_1}{dt}, \quad 0 = i_3(R_a + R_b) - i_4 R_b + \frac{d\psi_3}{dt}, \\ u_{BC} &= (i_2 - i_1)R_B + i_2 R_C + \frac{d\psi_2}{dt}, \quad 0 = (i_4 - i_3)R_B + i_4 R_4 + \frac{d\psi_4}{dt}. \end{aligned}\right\} (2.11)$$

В системе (2.11) потокосцепления контуров

$$\psi_1 = i_1 L_{11} + i_2 L_{12} + i_3 L_{13} + i_4 L_{14},$$

$$\psi_3 = i_1 L_{31} + i_2 L_{32} + i_3 L_{33} + i_4 L_{34},$$

$$\psi_2 = i_1 L_{21} + i_2 L_{22} + i_3 L_{23} + i_4 L_{24},$$

$$\psi_4 = i_1 L_{41} + i_2 L_{42} + i_3 L_{43} + i_4 L_{44},$$

при этом собственные индуктивности контуров

$$L_{11} = L_A - 2L_{AB} + L_B, \quad L_{22} = L_B - 2L_{BC} + L_C,$$

$$L_{33} = L_a - 2L_{ab} + L_b, \quad L_{44} = L_b - 2L_{bc} + L_c,$$

а взаимные индуктивности контуров соответственно

$$L_{12} = L_{21} = L_{AB} - L_{AC} - L_B + L_{BC}, \quad L_{23} = L_{32} = L_{Ba} - L_{Bb} - L_{Ca} + L_{Cb},$$

$$L_{13} = L_{31} = L_{Aa} - L_{Ab} - L_{Ba} + L_{Bb}, \quad L_{24} = L_{42} = L_{Bb} - L_{Bc} - L_{Cb} + L_{Cc},$$

$$L_{14} = L_{41} = L_{Ab} - L_{Ac} - L_{Bb} + L_{Bc}, \quad L_{34} = L_{43} = L_{ab} - L_{ac} - L_b + L_{bc}.$$

К системе уравнений (2.11) необходимо добавить уравнение моментов и движения (2.8).

В результате преобразований трехфазный АД оказывается приведенным к двухфазному, оси фаз которого сдвинуты на 120

электрических градусов, что позволяет при моделировании получать токи в их естественном виде, и облегчает прямой анализ процессов в машине. Достаточно просто такая математическая модель формируется и для иной схемы соединения обмоток статора и ротора.

2.2 Моделирование режима обрыва стержней короткозамкнутого ротора

Для проверки адекватности предлагаемой математической модели АД достаточно исследовать режим пуска, нагрузки и холостого хода в целом АД и при наличии повреждений «беличьей клетки».

Режим пуска неповрежденного АД моделируется следующим образом. В момент включения АД токи $i_1 - i_4$ в обмотках статора и ротора, угловая скорость ω_2, и угол γ равны нулю. Время исследуемого процесса разбивается на временные интервалы длительностью Δt.

Считается, что внутри каждого временного интервала $i_1 - i_4$, ω_2, s, γ и сопротивления обмоток неизменны. При переходе из временного интервала g во временной интервал $g+1$ эти величины рассчитываются по формулам, приведенным ниже.

При включении АД в сеть в i-ом контуре ток определяется как сумма токов i_{ni} периодической и i_{ai} апериодической составляющих [1].

Апериодическую составляющую тока i_{ai} ищут в виде полного решения системы однородных дифференциальных уравнений, получаемой из (2.1) приняв в ней U_{AB} и U_{BC} равными нулю. Для численного решения система преобразуется в соответствии с [37]. Периодическая составляющая i- го тока во временном интервале g ищется в виде частного решения системы неоднородных уравнений, получаемой из (2.11). В этой системе напряжения синусоидальны, а оператор дифференцирования d/dt заменен на $j\omega$

$$\left.\begin{aligned}
\dot U_{AB} &= [(R_A + R_B) + jX_{11}]\dot I_1 + (-R_B + jX_{12})\dot I_2 + jX_{13}\dot I_3 + jX_{14}\dot I_4 \\
\dot U_{BC} &= (-R_B + jX_{21})\dot I_1 + [(R_B + R_C) + jX_{22}]\dot I_2 + jX_{23}\dot I_3 + jX_{24}\dot I_4 \\
0 &= jX_{31}\dot I_1 + jX_{32}\dot I_2 + [(R_a + R_b) + jX_{33}]\dot I_3 + (-R_b + jX_{34})\dot I_4 \\
0 &= jX_{41}\dot I_1 + jX_{42}\dot I_2 + (-R_b + jX_{43})\dot I_3 + [(R_a + R_b) + jX_{44}]\dot I_4
\end{aligned}\right\} \quad (2.12)$$

Индуктивные сопротивления рассчитываются как

$$X_{vw} = \omega L_{vw},$$

где v и w принимают значения от одного до четырех.

Величины токов в контурах определяются по методу Гаусса в комплексной форме. Токи фаз находятся из соотношений (2.12). Режим работы АД задается R_a, R_b и γ, которые, как и в схемах замещения, определены скольжением ротора, при этом

$$s_g = (\omega/p - \omega_{2,g})/(\omega/p); \quad \gamma_{g+1} = \gamma_g + \omega/p(1 - s_g);$$

$$R_a = R_2' K_R + R_2' K_R (1 - s_g)/s_g; \quad R_b = R_a;$$

$$L_{A\delta} = L_{B\delta} = L_{C\delta} = L_1 K_{X1}; \qquad L_{a\delta} = L_{b\delta} = L_{c\delta} = L_2' K_{X2}/2;$$

$$L_{AB\delta} = L_{BC\delta} = L_{CA\delta} = L_1 K_{X1}; \quad L_{ab\delta} = L_{bc\delta} = L_{ca\delta} = L_2' K_{X2}/2,$$

где K_R – коэффициент изменения общего активного сопротивления фазы ротора (статора) под влиянием эффекта вытеснения тока и от насыщения;

K_{X2} (K_{X1}) – коэффициенты изменения общего реактивного сопротивления фазы ротора (статора) под влиянием эффекта вытеснения тока и от насыщения;

L_1 – индуктивность обмотки статора;

L_2' – индуктивность обмотки статора и приведенная индуктивность обмотки ротора.

Коэффициенты изменения общего активного и реактивного сопротивления фазы ротора (статора) рассчитываются по [37]

На рисунке 2.2 представлены результаты моделирования тока фазы I_1 в режиме пуска ненагруженного АД АОЛ2-11-4 (расчетная кривая 1, экспериментальная характеристика 2).

Сопоставление результатов моделирования и эксперимента показало, что погрешность моделирования не превышает 5–15 % в самом неблагоприятном случае. Аналогичная погрешность при моделировании этих режимов получена для двигателей собственных нужд электрических станций типа ДАЗО 15-39-10 и ДАЗО 17-69-8/10.

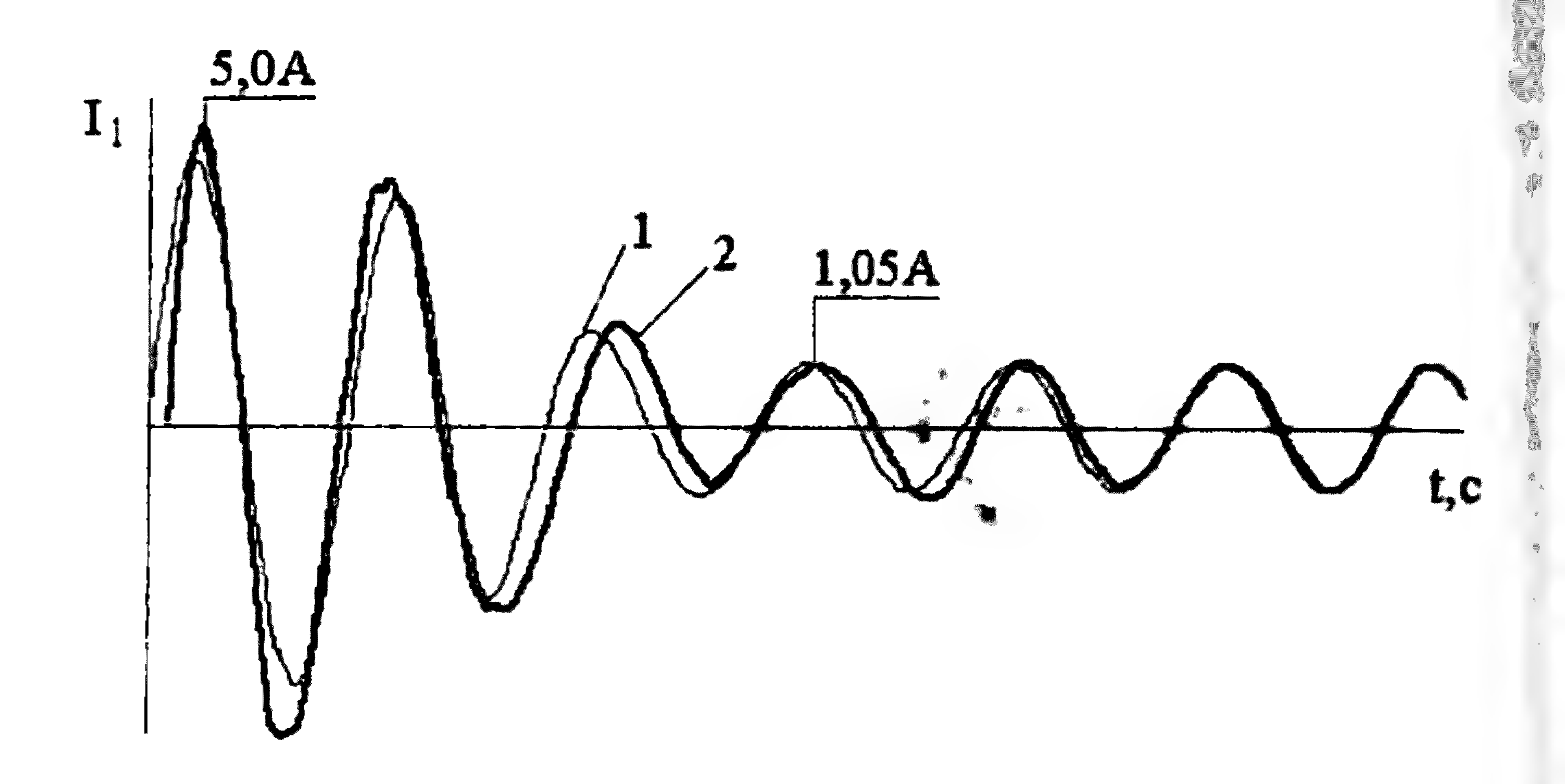


Рисунок 2.2 – Режим пуска АОЛ2-11-4

При моделировании режима работы АД с поврежденной «беличьей клеткой» используют схему распределения токов по элементам «беличьей клетки» короткозамкнутого ротора АД приведенную на рисунке 2.3.

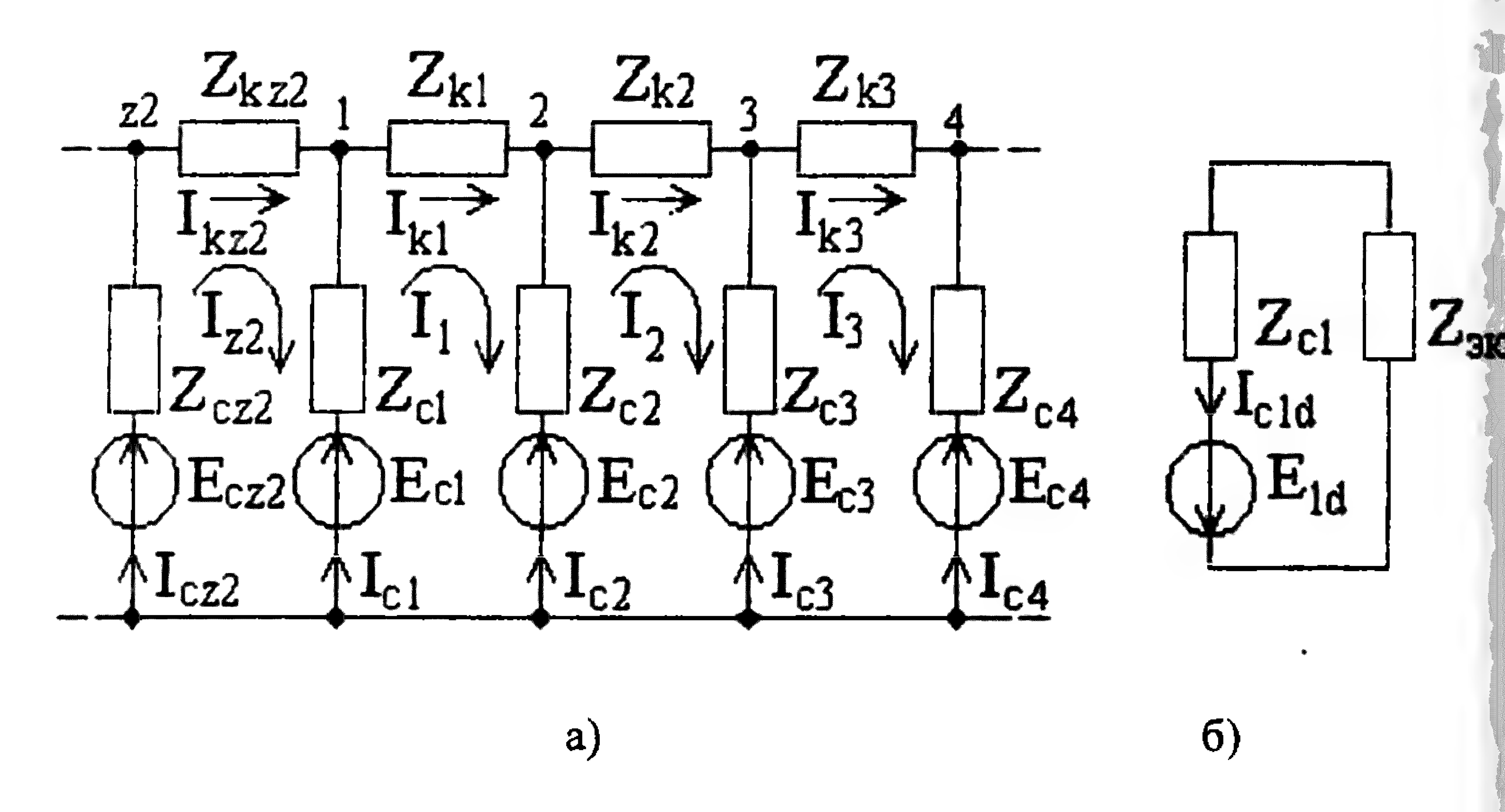


Рисунок 2.3 – Распределение токов по элементам «беличьей клетки» короткозамкнутого ротора АД

В соответствии с этой схемой действующие значения токов в элементах кольца и стержнях «беличьей клетки» связаны

следующими соотношениями [1]

$$I_2 = I_a k_I, \quad I_{k1} = I_{k2} = ... = I_{kz2} = I_2, \quad I_{c1} = I_{c2} = ... = 2I_2 \sin\frac{\pi p}{z_2},$$

где I_{kn} – ток в n- м элементе кольца;

I_{cn} – ток в n- м элементе стержня.

ЭДС на рисунке 2.3,а, индуцируемые в элементах "беличьей клетки" при заданном скольжении, определяются из системы уравнений

$$\begin{bmatrix} E_{c1} - E_{c2} \\ E_{c2} - E_{c3} \\ E_{c3} - E_{c4} \\ . \\ E_{cn} - E_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(Z_c + Z_k) & -Z_c & 0 & ..-Z_c \\ -Z_c & 2(Z_c + Z_k) & -Z_c & ..0 \\ 0 & -Z_c & 2(Z_c + Z_k) & ..0 \\ . & . & . & . \\ 0 & 0 & -z_c & ..2(Z_c + Z_k) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ . \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

и соотношений

$$E_{k1} = E_{c1} - E_{c2}, \; E_{k2} = E_{c2} - E_{c3} \; .... E_{kn-1} = E_{cn-1} - E_{cn},$$

где $E_{c1} \div E_{cn}$ – ЭДС в стержнях.

При обрыве стержней собственные активные сопротивления фаз ротора рассчитываются как

$$R_a^{*} = k_a^r R_a; \quad R_b^{*} = k_b^r R_b; \quad R_{\tilde{n}}^{*} = k_c^r R_c,$$

а его собственные и взаимные индуктивности, например фазы a

$$L_a^{*} = \left(k_a^x\right)^2 L_a; \; L_{ab}^{*} = \sqrt{k_a^x k_b^x}\, L_{ab}; \; L_{ac}^{*} = \sqrt{k_a^x k_c^x}\, L_{ac}$$

$$L_{Aa}^{*} = k_a^x L_{Aa}; \; L_{Ba}^{*} = k_a^x L_{Ba}; \; L_{Ca}^{*} = k_a^x L_{Ca},$$

где знаком (*) помечаются их значения после аварии.

Собственные и взаимные индуктивности фаз В и С рассчитываются аналогично. При этом коэффициенты определяются по формулам

$$k_a^r = P_a / P_a^* ; \; k_b^r = P_b / P_b^* ; \; k_c^r = P_c / P_c^* ,$$

$$k_a^x = Q_a / Q_a^* ; \; k_b^x = Q_b / Q_b^* ; \; k_c^x = Q_c / Q_c^* ,$$

где P_a, P_b, P_c (Q_a, Q_b, Q_c) – активные (реактивные) мощности фаз А, В и С неповрежденного ротора;

P_a^*, P_b^*, P_c^* (Q_a^*, Q_b^*, Q_c^*) – активные (реактивные) мощности фаз А, В и С при обрыве стержней ротора.

Активные и реактивные мощности фаз А, В и С ротора

$$P_a = \sum_{n_a} R_c I_{can}^2 + 2R_k I_{kan}^2 ; \; Q_a = \sum_{n_a} X_c I_{kan}^2 + 2X_k I_{kan}^2 ;$$

$$P_b = \sum_{n_b} R_c I_{cbn}^2 + 2R_k I_{kbn}^2 ; \; Q_b = \sum_{n_b} X_c I_{cbn}^2 + 2X_k I_{kbn}^2 ;$$

$$P_{ñ} = \sum_{n_c} R_c I_{cñn}^2 + 2R_k I_{kñn}^2 ; \; Q_c = \sum_{n_c} X_c I_{ccn}^2 + 2X_k I_{kcn}^2 ,$$

где I_{can}, I_{cbn} и I_{ccn} – ток в n-ом стержне фаз А, В и С ротора;

I_{kan}, I_{kbn} и I_{kcn} – ток в n-ом элементе кольца фаз А, В и С ротора.

Токи в элементах «беличьей клетки» с учетом рисунка 2.3,а представляют в виде суммы токов до обрыва стержней и добавочных токов. Добавочные токи в стержнях и элементах кольца ротора также определяют по (2.13), где матрицу ЭДС ($E_{c1} - E_{c2}$, $E_{c2} - E_{c3}, \ldots$) заменяют матрицей добавочных ЭДС (E_{1d}, $E_{2d} \ldots$) поврежденных стержней. Например, при обрыве первого стержня $E_{c1} - E_{c2}$

заменяют E_{1d}, а все остальные приравнивают нулю. В результате получим выражение

$$\begin{bmatrix} I_{1d} \\ I_{2d} \\ I_{3d} \\ \cdot \\ I_{nd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1d} \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \Bigg/ \begin{bmatrix} 2(Z_c + Z_k) & -Z_c & 0 & ...-Z_c \\ -Z_c & 2(Z_c + Z_k) & -Z_c & ...0 \\ 0 & -Z_c & 2(Z_c + Z_k) & ...0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & -Z_c & ...2(Z_c + Z_k) \end{bmatrix}$$

ЭДС E_{1d} рассчитывают по схеме на рисунке 2.3,б, которую получают из рисунка 2.3,а. Очевидно, дополнительный ток, создаваемый E_{1d} в поврежденном стержне, должен быть равен току в этом стержне до аварии по величине и иметь противоположный знак. Тогда их сумма

$$I_{c1d} + I_{c1} = 0.$$

Анализ токов в стержнях и участках колец до аварии и дополнительных токов в этих элементах "беличьей клетки" по схеме на рисунке 2.3,а показывает, что дополнительный ток I_{kd26} в участке кольца перед поврежденным стержнем также равен нулю. Это позволяет разорвать схему в этом месте и определить $Z_{экв}$ для рисунка 2.3,б, путем сворачивания схемы относительно поврежденного стержня. А так как добавочный ток в поврежденном стержне известен, то добавочная ЭДС

$$E_{1d} = -I_{c1d}(Z_{c1} + 2Z_{k1} + Z_{экв}). \qquad (2.14)$$

Если оборвано два стержня, то схема на рисунке 2.3,б будет иметь два контура. В ней ЭДС E_{1d}, и E_{2d} определяют путем сворачивания схемы из условия

$$I_{c1d} = -I_{c1} \text{ и } I_{c2d} = -I_{c2}, \text{ а } Z_{экв}$$

Результаты расчета амплитудного значения токов в стержнях (кривые 1), основных (кривые 2) и дополнительных (кривые 3) токов элементах кольца ротора АД АОЛ2-11-4 в режиме нагрузки при

обрыве одного (кривые ▬) и двух (кривые —) стержней представлены на рисунке 2.4.

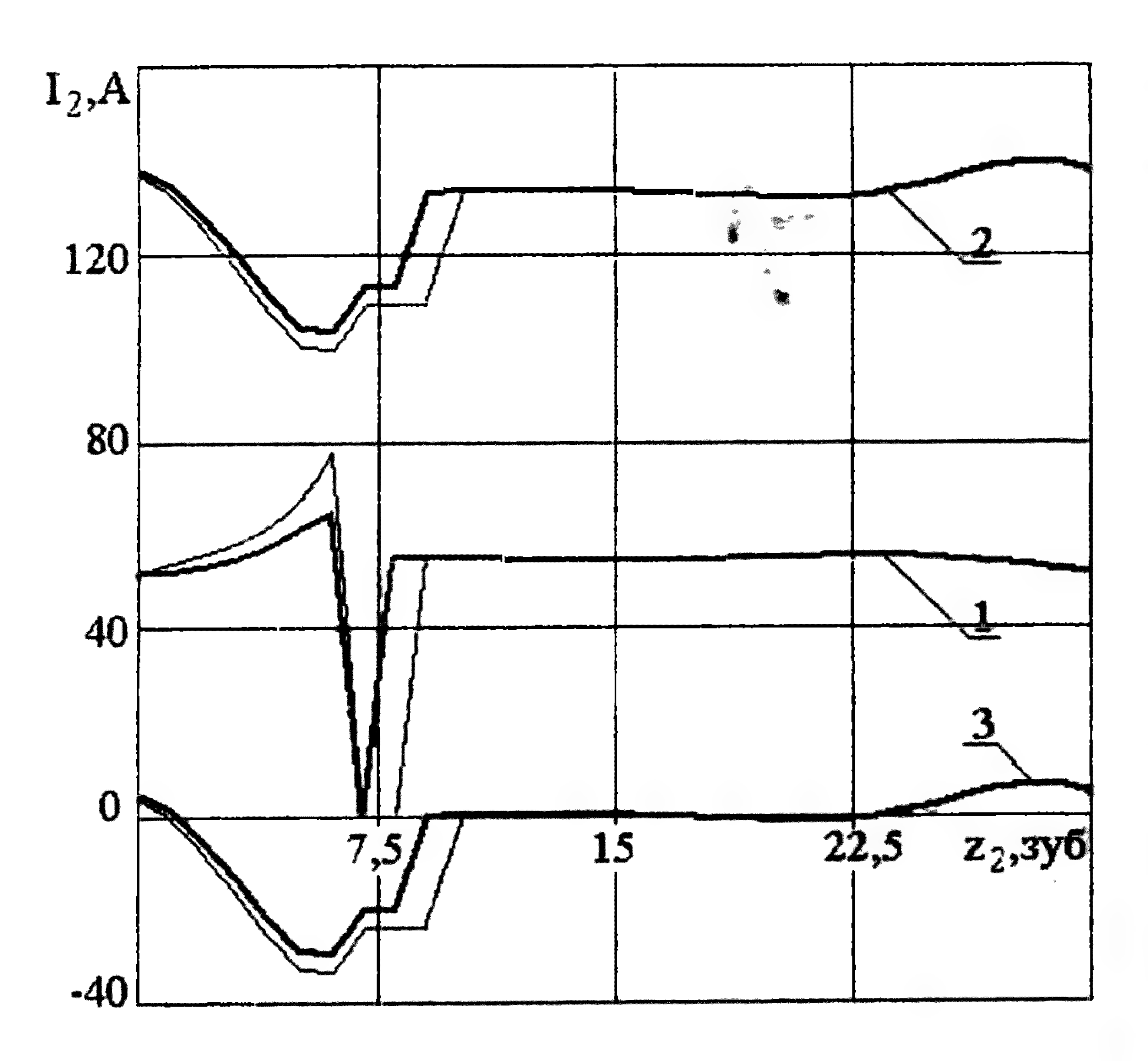


Рисунок 2.4 – Токи в стержнях и фазах ротора при обрыве одного и двух стержней в режиме максимальной нагрузки

При моделировании процесса пуска двигателя АО2-31-4 с номинальной нагрузкой были получены кривые тока фазы А, коэффициента мощности $\cos\varphi$ и электромагнитного момента M_a. На рисунке 2.5,а представлен режим пуска – номинальной нагрузки с неповрежденным ротором, а на рисунках 2.5,б и 2.5,в с обрывом одного и трех стержней соответственно.

Анализ графиков показал, что при повреждении одного и трех стержней ротора, фазный ток увеличивается на 1,995 % и 8,806 %, $\cos\varphi$ повышается на 0,483 % и 1,413 %,а его колебания достигают 24 %, и 73 % соответственно. При этом соответственно увеличивается время пуска. Как показали расчеты и эксперименты на двигателях СН типа ДАЗО 15-39-10 и ДАЗО 17-69-8/10 Павлодарской ТЭЦ-1

колебания фазного тока и $cos\varphi$ несколько меньше из-за большего числа пар полюсов.

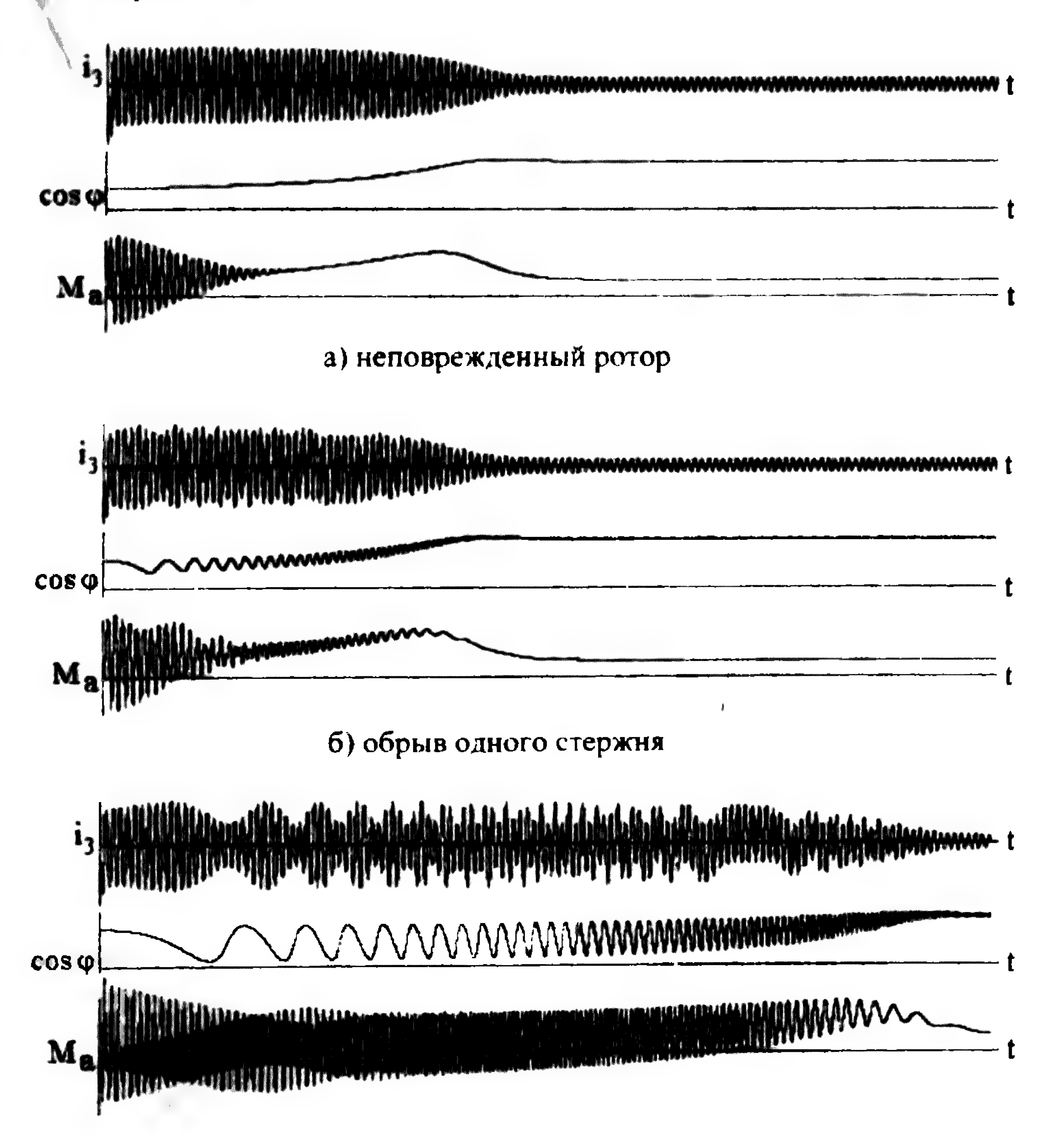


Рисунок 2.5 – Результаты расчета тока фазы А, $cos\varphi$ и электромагнитного момента

Для моделирования магнитных полей в торцевой зоне АД требуются величины токов ротора и статора в исследуемом режиме.

Их значения для АД АОЛ2-11-4 приведены в таблице 2.1, где ток фазы статора (числитель) и скольжение при фиксированной нагрузке получено экспериментально, а ток фазы (знаменатель), ток фазы ротора I_2 и добавочный ток I_∂ получены расчетным путем для тех же скольжений при разрыве одного стержня.

Таблица 2.1

Режим работы АД	Ток статора I_1, А	Ток ротора I_2, А	Добавочный ток I_∂,А	Скольжение ротора s, о.е.
Холостой ход АД	0,95/0,951	6,11	0,824	~0,004
Холостой ход АД с механизмом	1,05/0,958	15,1	2,03	0,01
Нагрузка №1	1,35/1,23	80,3	10,84	0,051
Нагрузка №2	1,45/1,32	93,3	12,6	0,059
Нагрузка №3	1,7/1,66	136,8	18,44	0,087

2.3 Выбор информационного признака повреждения обмотки короткозамкнутого ротора

С учетом положений §2.2, информацию о повреждении «беличьей клетки» АД можно получить из его моментов, токов статора [57–59] или из магнитных полей рассеяния в торцевой зоне [60] или на поверхности машины [50, 63].

Токи статора и электромагнитные моменты [57–59] и [61, 67] малоинформативны, так как их изменение при обрыве стержня значительно меньше их изменения, например, при смене режима работы. Токи ротора, несомненно, несут больше информации об этом виде повреждения. Однако получить ее традиционным путем достаточно сложно. В данной работе предлагается получать информацию о повреждении «беличьей клетки» из ЭДС помощью точечных индукционных преобразователей (ТИП) размещаемых внутри или снаружи АД.

Если пренебречь полем рассеяния воздушного зазора, то ЭДС в ТИП, расположенном в торцевой зоне или снаружи, наводится только токами обмоток статора и ротора. При этом в соответствии с §2.2 токи обмотки ротора представляют в виде токов неповрежденного ротора и добавочных токов. Спектр составляющих этой ЭДС ТИП зависит от места его расположения, конструкционных особенностей АД и состояния его «беличьей клетки», режима работы и вида нагрузки. А

информацией о повреждении «беличьей клетки» необходимой для дальнейших исследований может служить одна или несколько гармонических этого спектра в диапазоне частот 0–50 Гц, который разделен на количество областей измерения, равное $i = (p-1)$.

Если ТИП установить в области торцевой зоны, то его взаимное расположение по отношению к обмоткам статора и ротора будет соответствовать схеме на рисунке 2.6.

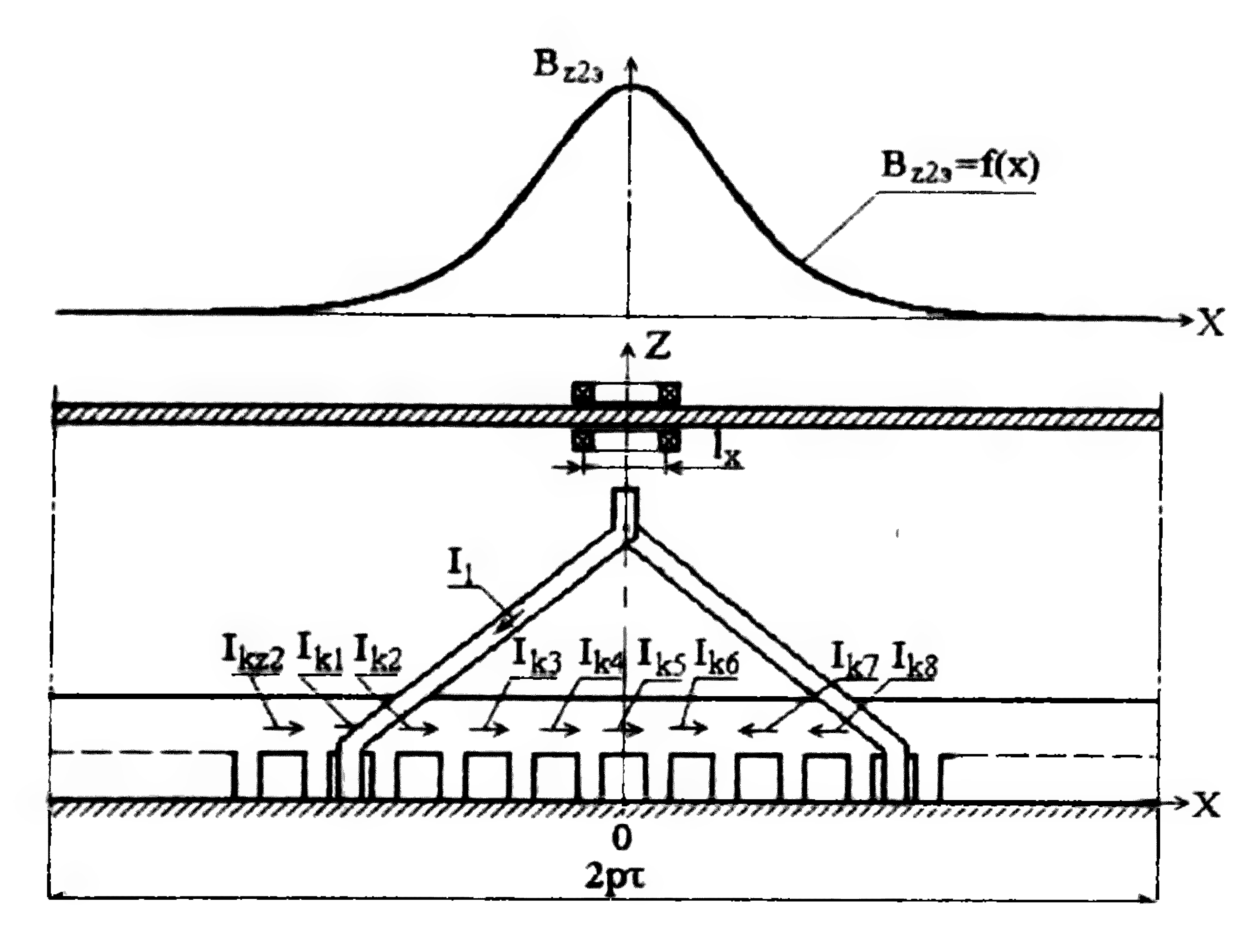


Рисунок 2.6 – Взаимное расположение ТИП и обмоток статора и ротора в торцевой зоне АД

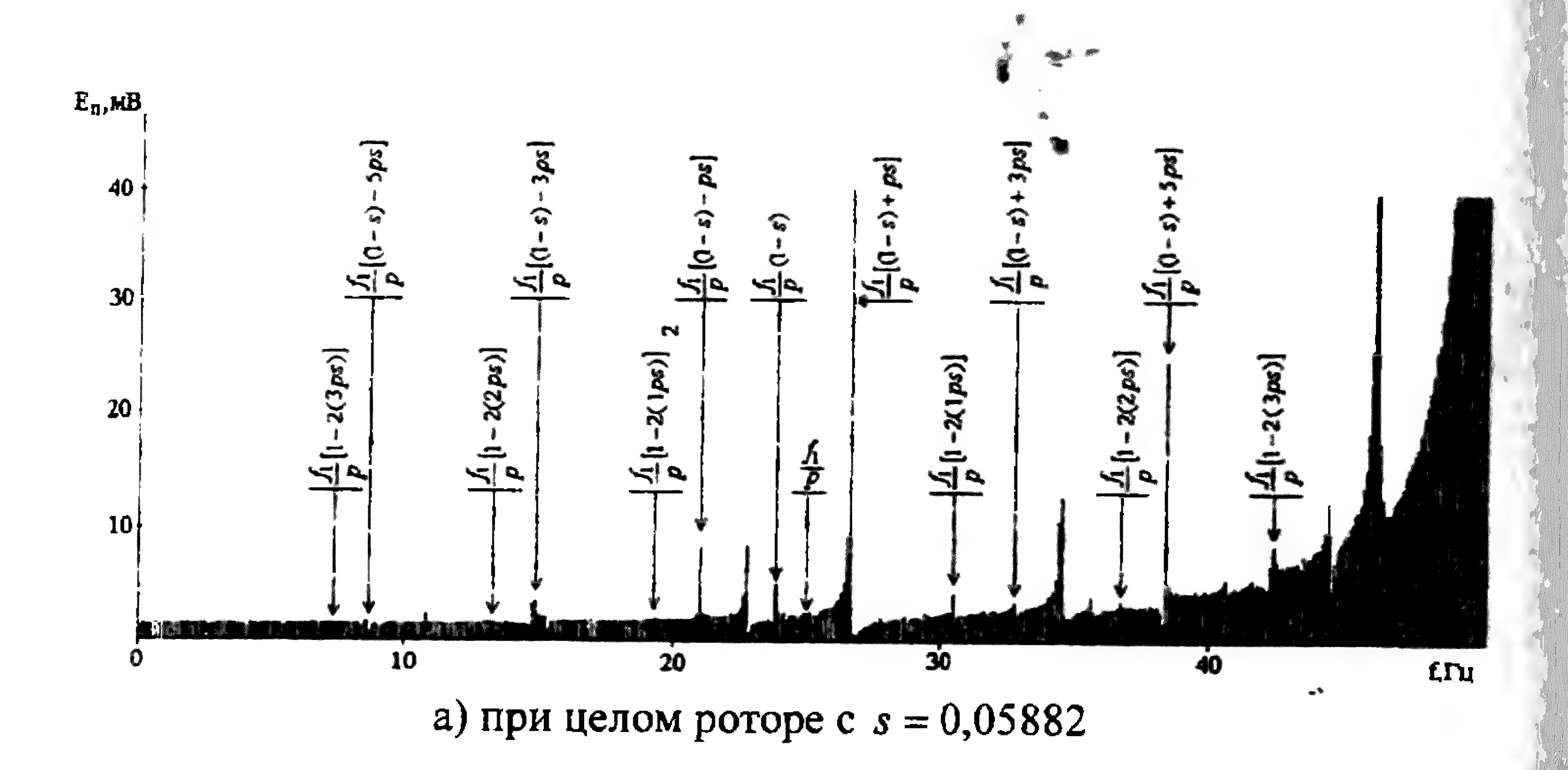
Тогда для АД с $2p = 4$ (i=1) имеется одна область измерения 0–50 Гц. Составляющие спектра ЭДС ТИП для него в этой области частот приведены на рисунке 2.7 и определяются следующим образом.

Из рисунка 2.6 видно, что обмотка статора в АД неподвижна (показана одна секция), а в ее витках протекают токи I_1 с частотой сети f_1=50 Гц. Эти токи формируют в торцевой зоне АД магнитные потоки лобового рассеяния и индуцируют в обмотке ТИП ЭДС E_{n1} с частотой f_1 сети. Ее амплитудное значение можно определить как

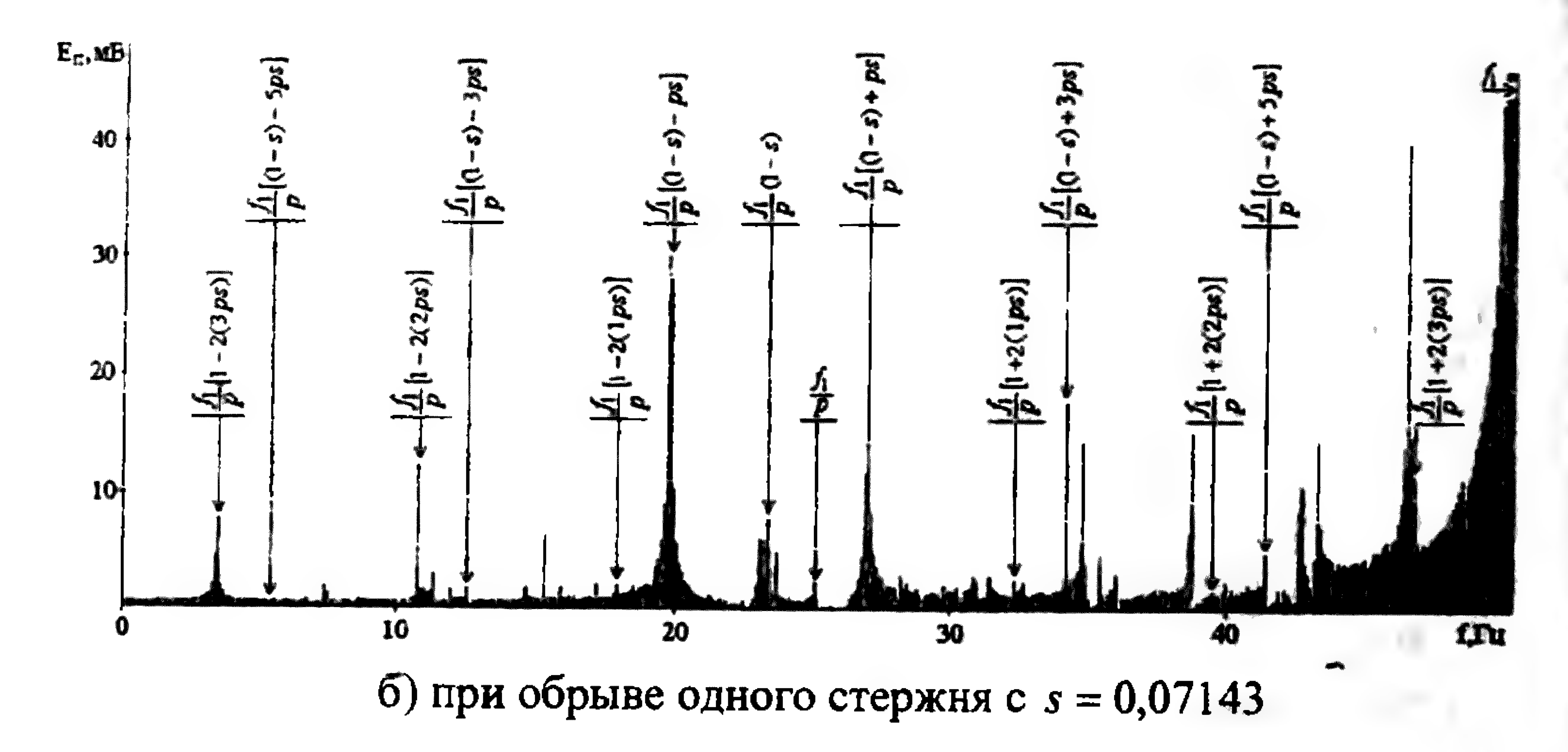
$$E_{n1} = 2\pi f_1 B_{z1} S_n w_n, \qquad (2.15)$$

где B_{z1} – индукция магнитного поля лобового рассеяния обмотки статора, пересекающего плоскость ТИП;

S_n – площадь ТИП.



а) при целом роторе с $s = 0{,}05882$



б) при обрыве одного стержня с $s = 0{,}07143$

Рисунок 2.7 – Спектр гармонических ЭДС ИП полученных экспериментально на двигателе АОЛ2-11-4 при расположении ТИП на внешней поверхности подшипникового щита и фиксированной нагрузке

Короткозамкнутая обмотка ротора АД формирует магнитное

поле лобового рассеяния с числом полюсов равным p, вращающееся с угловой скоростью $\omega_2 = \omega_1/p$ относительно ТИП и индуцирует в нем ЭДС с амплитудным значением

$$E_{n2} = 2\pi \frac{f_1}{p} B_{z2} S_n w_n, \tag{2.16}$$

где B_{z2} – индукция магнитного поля лобового рассеяния обмотки целого ротора, пересекающего плоскость ТИП.

В то же время, поле лобового рассеяния от тока поврежденного элемента короткозамкнутой обмотки ротора АД имеет одну пару полюсов и вращается с угловой скоростью $\omega_{2_r} = \omega_1/p(1-s)$ относительно ТИП и индуцирует в нем ЭДС

$$E_{n2э} = 2\pi \frac{f_1}{p}(1-s) B_{z2э} S_n w_n, \tag{2.17}$$

где $B_{z2э}$ – индукция магнитного поля лобового рассеяния от дополнительного тока в элементах короткозамыкающего кольца при обрыве стержня ротора.

Нелинейность зависимости $B_{z2э} = f(x)$ и нагрузки, а следовательно неравномерность скольжения ротора, вызывают появление дополнительных гармонических ЭДС, которые определяют как

$$E_{n2д} = 2\pi \frac{f_1}{p}\left[(1-s) \pm nsp\right] B_{z2э} S_n w_n,\ n{=}1;\ 3;\ 5\ldots, \tag{2.18}$$

$$E^{*}_{n2д} = 2\pi \frac{f_1}{p}(1 \pm 2ksp) B_{n2э} S_n w_n,\ k{=}1;\ 2;\ 3\ldots \tag{2.19}$$

Уравнения (2.15–2.19) в достаточно полной мере описывают спектр гармонических ЭДС ТИП, что подтверждается рисунками 2.7,а и 2.7,б. Результаты измерения амплитуд некоторых гармонических по $E_{n2д}$ и $E^{*}_{n2д}$ приведены в приложении А. Изменение величины ЭДС $E^{*}_{n2д}$ при k=1; 2; 3 в зависимости от скольжения ротора по результатам эксперимента приведено также в приложении А. Из

экспериментальных данных видно, что амплитуды гармонических ЭДС $\dot{E}_{n2\partial}$ зависят не только от наличия поврежденного стержня, но и от неравномерности нагрузки. Поэтому, использовать их в качестве источника информации повреждения ротора нецелесообразно.

Более перспективны для этих целей ЭДС $E_{n2\partial}$, особенно те, у которых $k=1$. Экспериментальные зависимости их амплитуд от скольжения при целом (кривая 1) и поврежденном роторе (кривая 2) приведены на рисунке 2.8.

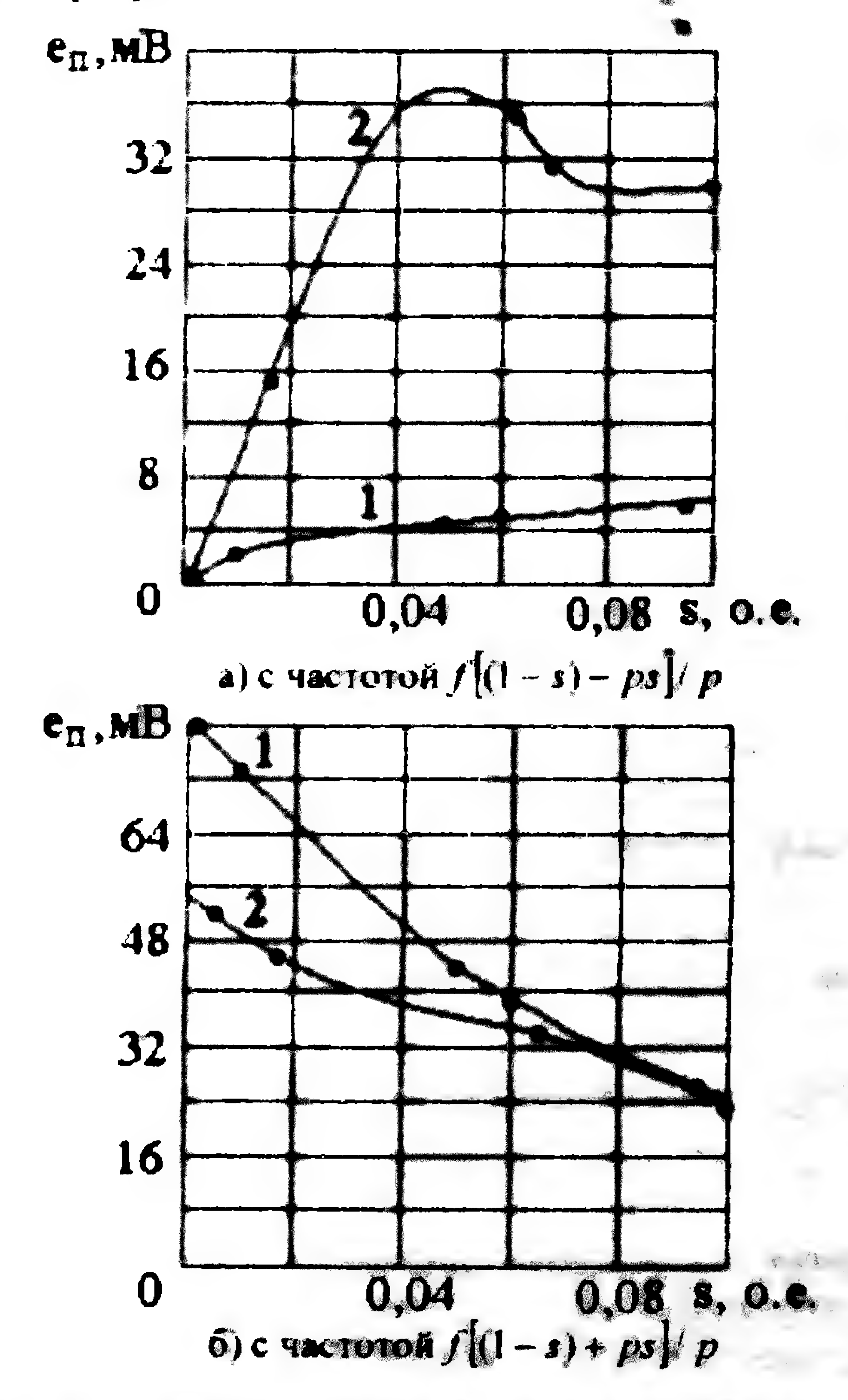
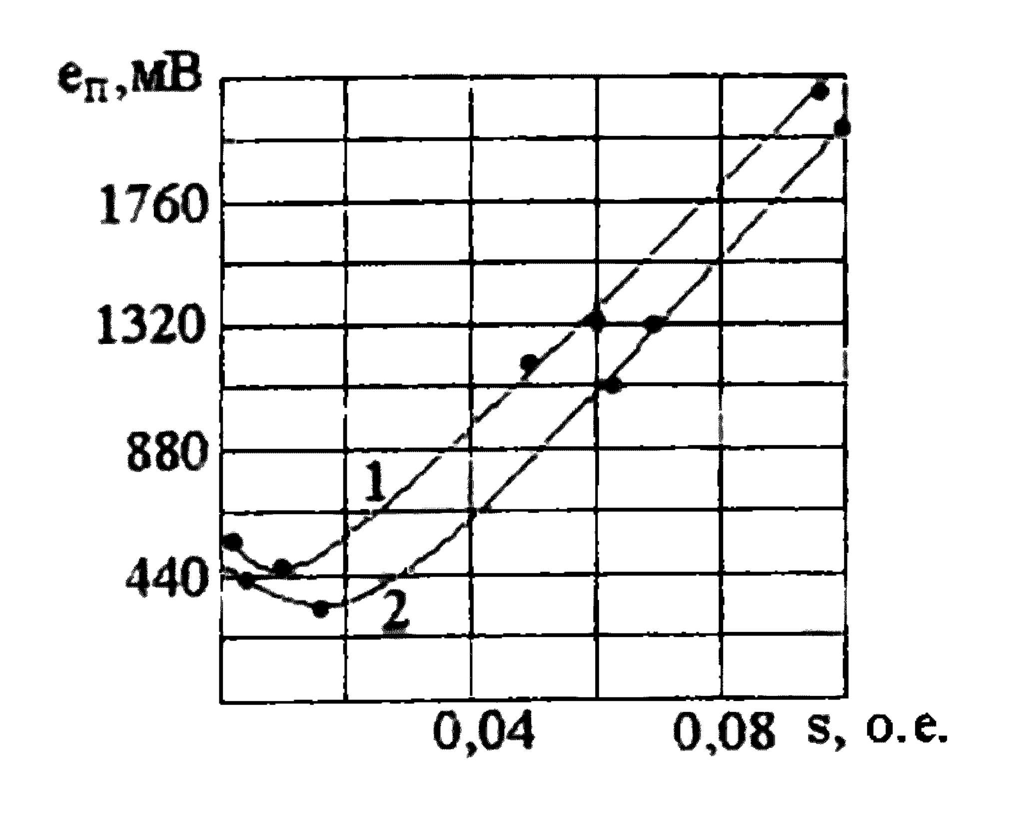
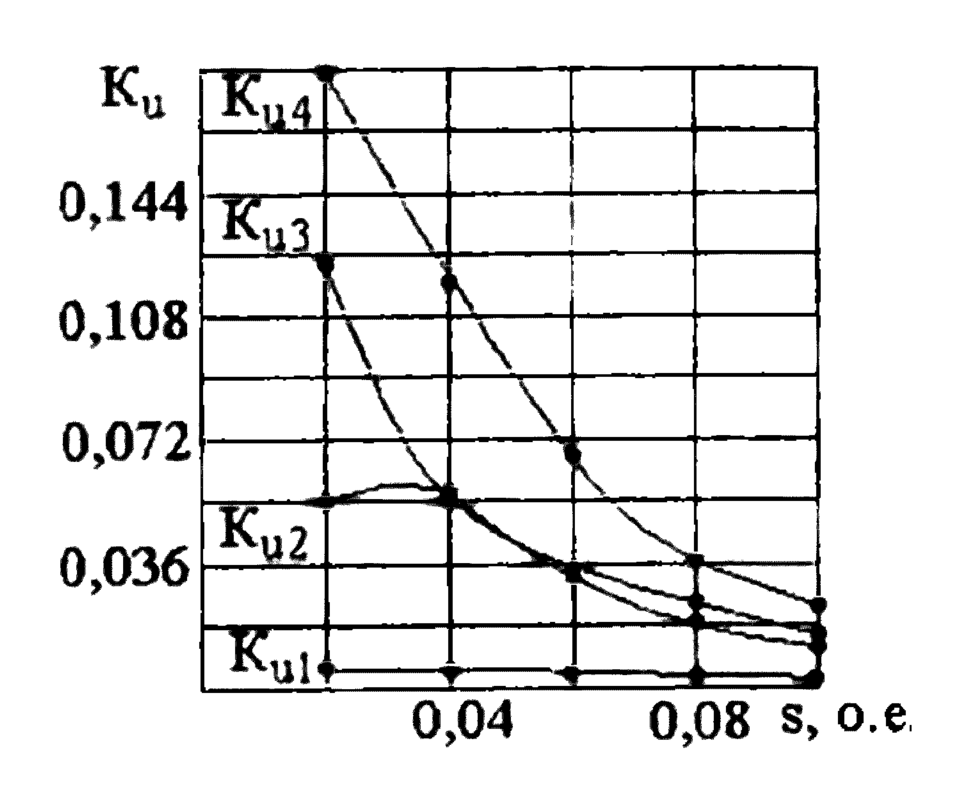


Рисунок 2.8 – Напряжение гармонических на выходе ТИП в зависимости от скольжения целого и поврежденного ротора АД АОЛ2-11-4

Амплитуды дополнительных гармонических $E_{n2\partial}$ зависят от места расположения ТИП на подшипниковом щите, поэтому необходимо оценивать их относительно амплитуды ЭДС основной гармонической сети с частотой f_1 получаемого спектра, которая определяется как $\dot{E}_{n1} + \dot{E}_{n2}$. Экспериментальные зависимости этих ЭДС от скольжения при целом (кривая 1) и поврежденном (кривая 2) роторе приведены на рисунке 2.9,а.



а) ЭДС гармонической f_1



б) коэффициенты исправности

Рисунок 2.9 – ЭДС гармонической f_1 на выходе ТИП и коэффициенты исправности целого и поврежденного ротора АД АОЛ2-11-4 в зависимости от скольжения

Тогда в качестве критерия исправности ротора принимаются коэффициенты

$$K_{u1} = E_{n2\partial 1ц} / (\dot{E}_{n1} + \dot{E}_{n2}),\ K_{u3} = (E_{n2\partial 1ц} + E_{n2\partial 2ц}) / (\dot{E}_{n1} + \dot{E}_{n2}),$$

$$K_{u2} = E_{n2\partial 1n} / (\dot{E}_{n1} + \dot{E}_{n2}),\ K_{u4} = (E_{n2\partial 1n} + E_{n2\partial 2n}) / (\dot{E}_{n1} + \dot{E}_{n2}),$$

где $E_{n2\partial 1ц}$ и $E_{n2\partial 1n}$ – экспериментальное значение ЭДС гармонической с частотой $f[(1-s)-ps]/p$ при целом и поврежденном роторе;

$E_{n2\partial 2ц}$ и $E_{n2\partial 2n}$ – экспериментальное значение ЭДС гармонической с частотой $f[(1-s)+ps]/p$ при целом и поврежденном роторе.

На рисунке 2.9,б представлены зависимости этих коэффициентов от скольжения АД АОЛ2-11-4. Из него видно существенное различие коэффициентов для АД с поврежденным и целым ротором.

Для АД с $2p = 6$ (i=2) составляющие спектра определяются для двух областей измерения. Диапазон этих областей ограничен частотами 0-25 Гц и 25-50 Гц. Магнитное поле лобового рассеяния короткозамкнутой обмотки ротора такого АД индуцирует ЭДС с амплитудным значением

$$E_{n2} = 2\pi \frac{f_1}{p} B_{z2} s_n w_n \text{ и } E_{n2} = 2\pi \frac{2f_1}{p} B_{z2} s_n w_n \qquad (2.20)$$

В то же время, поле лобового рассеяния от тока поврежденного элемента короткозамкнутой обмотки ротора АД индуцирует ЭДС

$$E_{n2э} = 2\pi \frac{f_1}{p} (1-s) B_{z2э} s_n w_n \text{ и } E_{n2э} = 2\pi \frac{2f_1}{p} (1-s) B_{z2э} s_n w_n . \qquad (2.21)$$

В результате, из-за неравномерности нагрузки появляются дополнительные гармонические ЭДС

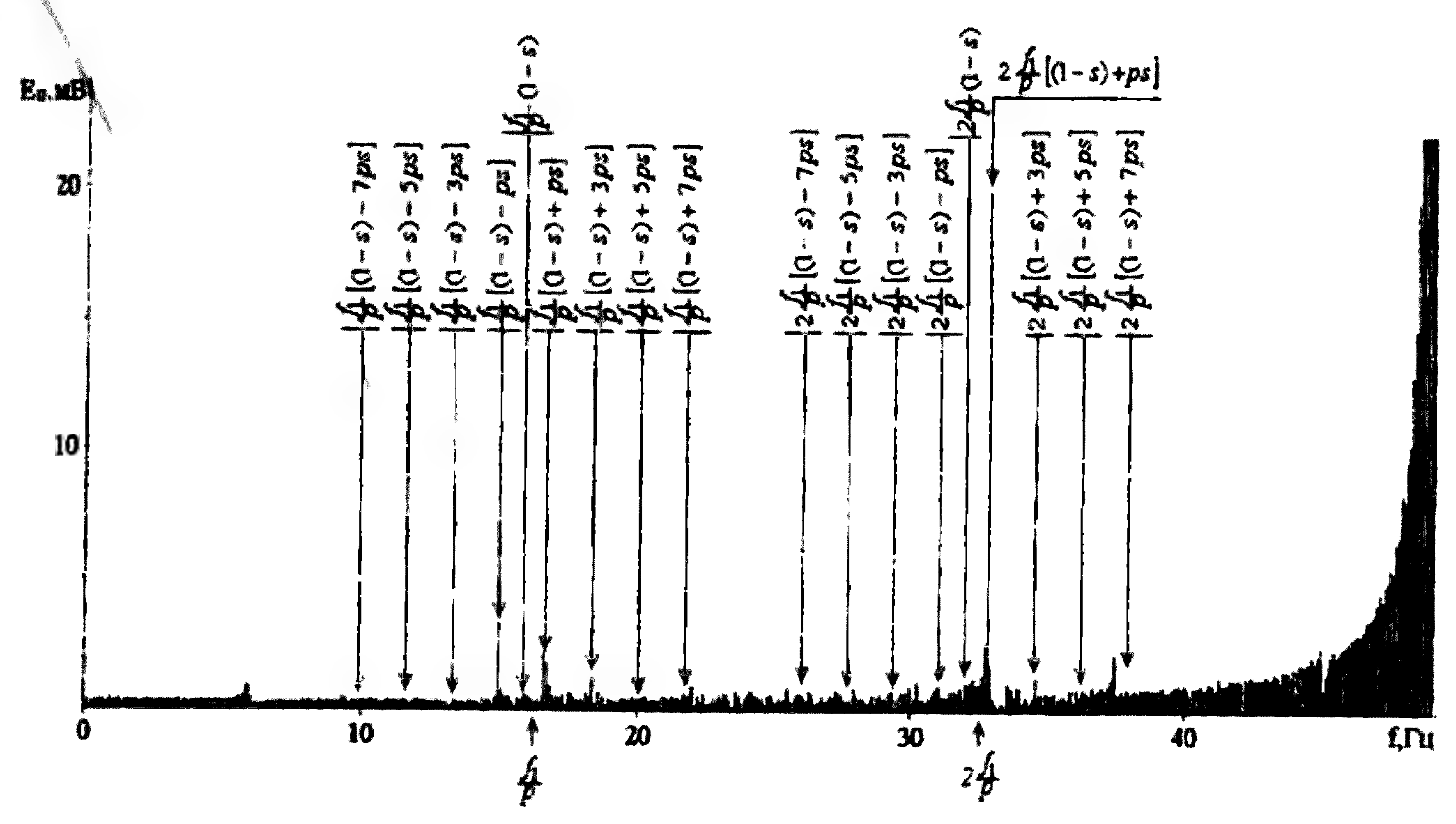
$$E_{n2д} = 2\pi \frac{f_1}{p} \left[(1-s) \pm nsp\right] B_{z2э} s_n w_n ,$$

$$E_{n2д} = 2\pi \frac{2f_1}{p} \left[(1-s) \pm nsp\right] B_{z2э} s_n w_n , \qquad (2.22)$$

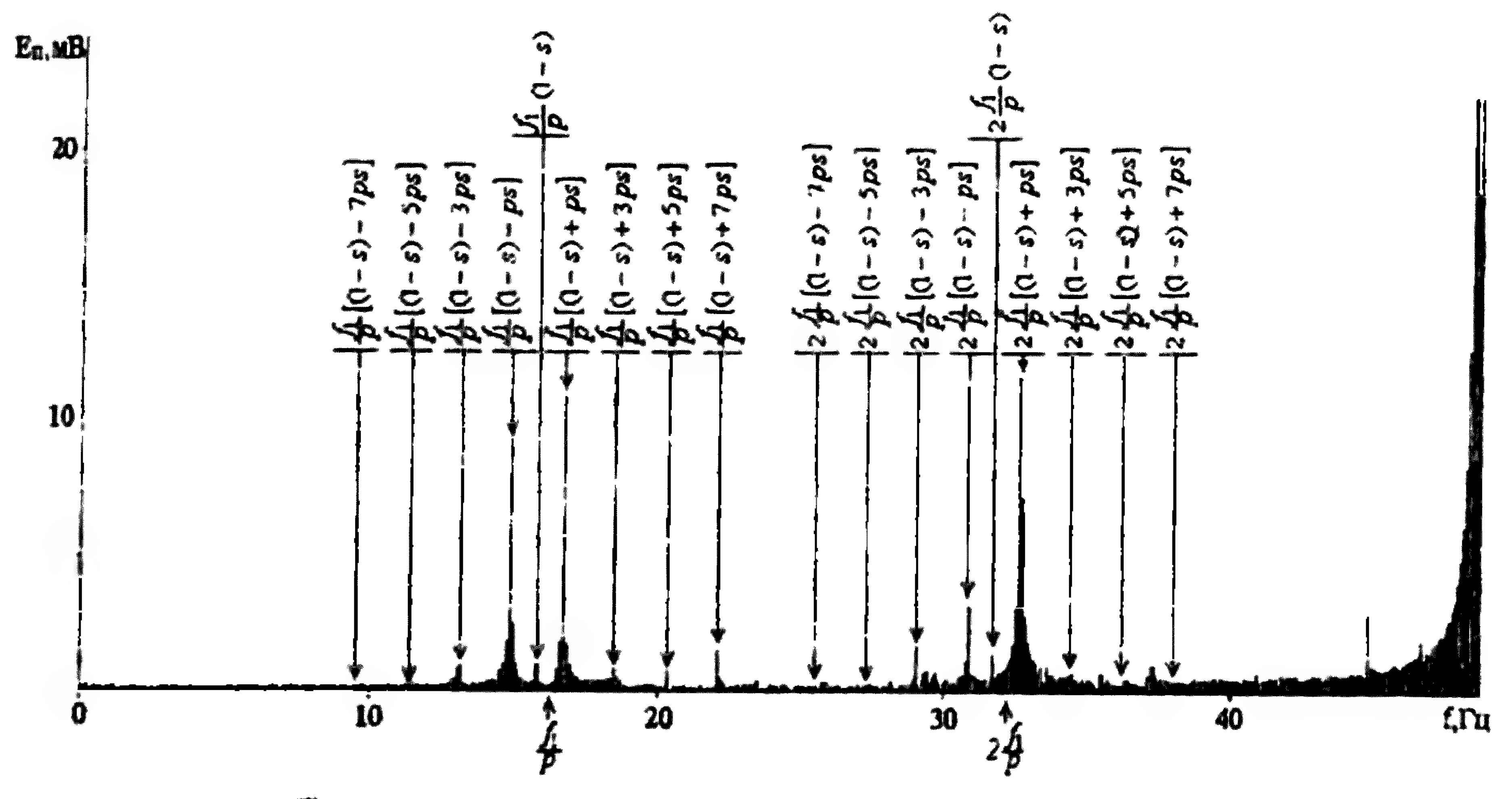
$$\overset{\bullet}{E}_{n2д} = 2\pi \frac{f_1}{p} (1 \pm ksp) B_{z2э} s_n w_n ,$$

$$\overset{\bullet}{E}_{n2д} = 2\pi \frac{2f_1}{p} (1 \pm ksp) B_{z2э} s_n w_n .$$

Определяемые по уравнениям (2.20) – (2.22) гармонические ЭДС ТИП, легко выделить на спектре гармонических ЭДС, представленном на рисунке 2.10, полученном экспериментально на двигателе 4АМ100L6У3 при расположении ТИП на внешней поверхности подшипникового щита. Результаты измерения амплитуд наиболее заметных из них вынесены в приложение А.



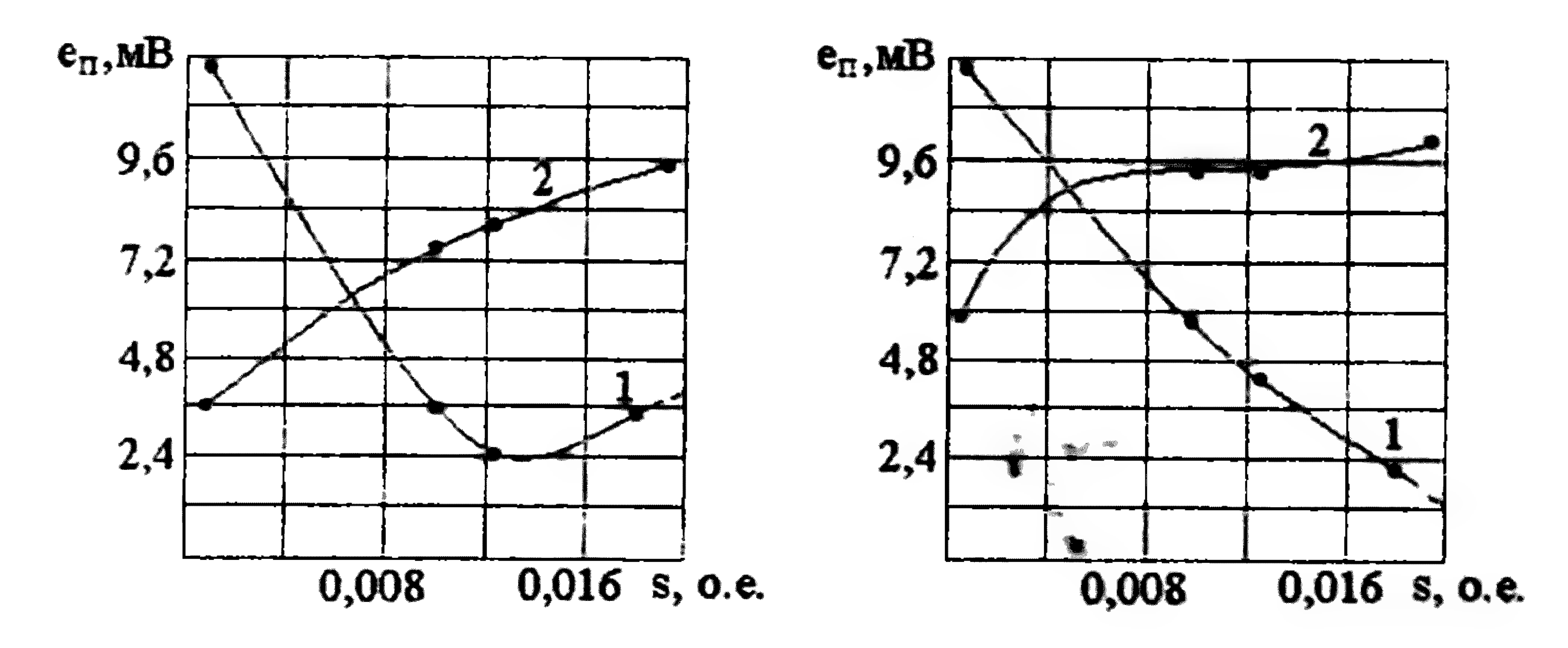
а) при целом роторе с $s = 0{,}0171$



б) при обрыве одного стержня с $s = 0{,}0192$

Рисунок 2.10 – Спектр гармонических ЭДС ТИП двигателя 4АМ100L6У3

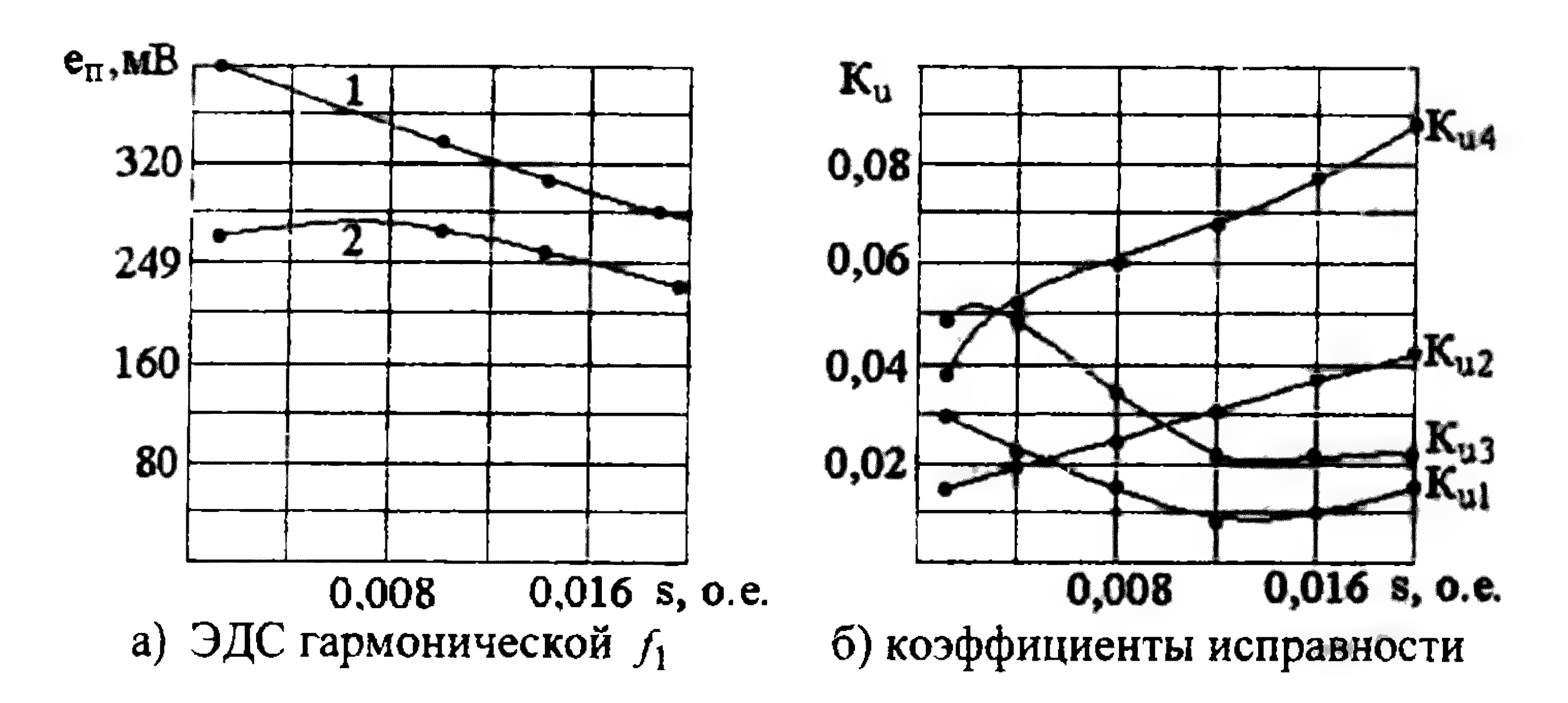
Зависимости напряжения гармонических $f[(1-s)-ps]/p$ и $f[(1-s)+ps]/p$ на выходе ТИП от скольжения целого (кривая 1) и поврежденного ротора (кривая 2) АД 4АМ100L6У3 построенные по данным приложения А в первой зоне измерения приведены на рисунках 2.11,а и 2.11,б.



а) гармонические $f[(1-s)-ps]/p$ б) гармонические $f[(1-s)+ps]/p$

Рисунок 2.11 – Напряжение гармонических на выходе ТИП в зависимости от скольжения целого и поврежденного ротора АД 4АМ100L6У3

Экспериментальная зависимость ЭДС основной гармонической сети с частотой f_1 от скольжения при целом (кривая 1) и поврежденном (кривая 2) роторе приведена на рисунке 2.12,а. А зависимость критерия исправности ротора в виде коэффициентов K_{u1} - K_{u4} от скольжения показана на рисунке 2.12,б.



а) ЭДС гармонической f_1 б) коэффициенты исправности

Рисунок 2.12 – ЭДС гармонической f_1 (а) на выходе ТИП и величины ЭДС $E_{n2\partial}$ по отношению к ним в зависимости от скольжения целого и поврежденного ротора АД 4АМ100L6У3

Из этого рисунка видно, что при скольжении s>0,008 коэффициенты K_{u2} и K_{u4} для АД с поврежденным ротором значительно превышают коэффициенты K_{u1} и K_{u3} с целым ротором и могут служить критерием исправности ротора.

Анализ аналогичных зависимостей гармонических $2f[(1-s)-ps]/3p$ и $2f[(1-s)+ps]/3p$ при целом (кривая 1) и поврежденном роторе (кривая 2) АД 4АМ100L6У3 второй зоны измерения показывает, что их также можно использовать для выявления повреждения ротора.

Очевидно, при $2p$>6 число областей i>2, а центр диапазона их частот определится как $f_1 i/p$, где i принимает значения от единицы до $(p-1)$. Тогда для i-й области ЭДС от тока поврежденного элемента короткозамкнутой обмотки ротора и неравномерности нагрузки

$$E_{n2i} = 2\pi \frac{f_1 i}{p} B_{z2} s_n w_n,\ E_{n2эi} = 2\pi \frac{f_1 i}{p} (1 - s) B_{z2э} s_n w_n,$$

$$E_{n2дi} = 2\pi \frac{f_1 i}{p} [(1-s) \pm ksp] B_{z2э} s_n w_n,$$

$$E^*_{n2дi} = 2\pi \frac{f_1 i}{p} (1 \pm ksp) B_{z2э} s_n w_n \quad (2.23).$$

Очевидно, что в частном случае при $2p=4$, т.е. когда такая область одна, уравнение (2.18) при n=1 совпадает с предложенным Elkasabgy в [60]. Исследование спектра гармонических ЭДС для АД с $2p \neq 4$ у него отсутствует, а поэтому является новым.

2.4 Способ диагностики повреждения короткозамкнутого ротора с герконом

При реализации устройства диагностики повреждения «беличьей клетки» короткозамкнутого ротора АД решается задача выделения из поля АД, с p числом полюсов, поля поврежденного стержня, у которого число пар полюсов равно двум.

С учетом того, что ЭДС ТИП внешней установки пропорциональна внешнему магнитному полю асинхронного двигателя, способ диагностики повреждения «беличьей клетки» с

герконом [80] основан на измерении в этой ЭДС суммы левой и правой дополнительных ЭДС $E_{n2дл} + E_{n2дп}$ с частотами гармонических по (2.18) $f_1/p[(1-s)\mp ps]$ и ЭДС E_{n1} основной гармоники сети с частотой f_1, а также коэффициента $K_u = (E_{n2дл} + E_{n2дп})/E_{n1}$ определяющего их отношение. По этому способу в ЭДС ТИП от внешнего магнитного поля контролируют величины суммы дополнительных гармонических ЭДС с частотами $f_1/p[(1-s)\mp ps]$ и основной гармоники сети, определяют их отношение в виде коэффициента K_u при заданном скольжении ротора s, который в свою очередь сравнивают с эталонной величиной при этом же скольжении и если он превышает эталонную величину, то формируют сигнал о наличии разрыва стержня «беличьей клетки» короткозамкнутого ротора.

На рисунке 2.13 приведена блок-схема устройства для реализации этого способа, где ТИП 1 на время диагностики помещают на внешней поверхности асинхронного двигателя 2, например на подшипниковом или торцевом щите, и подключают к первому входу 3 блока 4 коммутации. Ко второму входу 5 блока 4 коммутации подключается датчик скольжения ротора 6. Выходы 7 и 8 блока 4 коммутации подключены на входы 9 и 10 блока 11 выделения гармонических с частотами $f_1/p[(1-s)\mp ps]$ и f_1, а также блока 12 определения скольжения ротора. При этом выход блока 12 определения скольжения ротора подключен на вход 10 блока 11. Работой блоков 4, 11 и 12 управляет блок 13 времени, который запускается в работу при начале диагностирования ключом 14. Выход блока 11 через пороговый элемент 15 коэффициента K_u присоединяется на вход блока 16 индикации. Включение и отключение машины от сети осуществляется выключателем 17.

Датчик 1 магнитного поля может выполняться, например, в виде накладной катушки (ТИП). В датчик 6 скольжения короткозамкнутого ротора входит прикрепляемый к валу ротора 18 АД постоянный магнит 19 и установленный на его корпус геркон 20. Таким образом, контакты геркона 20 замыкаются под действием постоянного магнита 19 при каждом полном повороте вала 18 и по времени между такими замыканиями контактов геркона 20 можно судить о скольжении короткозамкнутого ротора. Как правило, датчики 1 и 6 устанавливаются на АД только на время диагностирования, а поэтому должны иметь универсальное крепление.

В данном устройстве в соответствии с рисунком 2.13 скольжение и ЭДС ТИП при диагностике контролируются последовательно. Это

обеспечивается работой блока 4 коммутации управляемого блоком 13 времени.

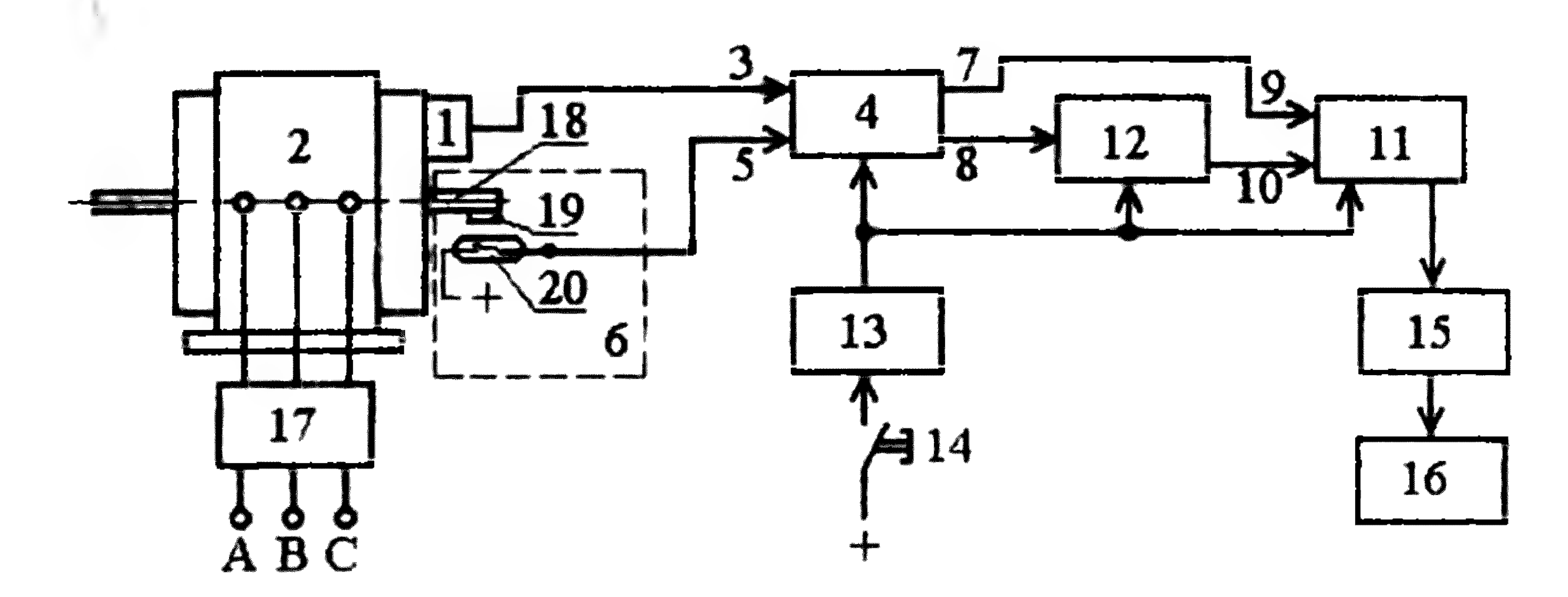


Рисунок 2.13 – Блок схема устройства диагностики повреждения «беличьей клетки» на ТИП, реализующего первый способ

Блок времени выполнен в виде реле времени, которое запускается в работу нажатием на кнопку управления 14. Что обеспечивает однократный полный цикл диагностирования, заключающийся в снятии напряжения $U_{нг}$ в течение времени $t_{дс}$ и $t_{дмп}$ с датчиков скольжения (геркона) и магнитного поля (ТИП). В блоке 12 математическим путем одним из известных методов определяется скольжение, а его значение подается в блок 11 выделения гармонических. Этот блок является перестраиваемым в зависимости от величины скольжения короткозамкнутого ротора фильтром. Он из электрического сигнала датчика 1 выделяет $E_{n2дл} + E_{n2дп}$ и определяет $K_{из}$. Блок 15 представляет собой пороговый элемент для коэффициента $K_{из}$, который срабатывает, если $K_{из}$ превышает порог срабатывания. Блок 16 выполняется в виде светодиода, который светится при срабатывании порогового элемента.

Во время работы по обмоткам АД с короткозамкнутого ротора протекают токи, которые формируют на его поверхности магнитное поле. Параметры этого поля в известной степени зависят от несимметрии, вызванной повреждением «беличьей клетки» ротора. Это магнитное поле индуцирует в датчике магнитного поля электродвижущую силу, из которой в блоке 11 выделяется сумма гармонических с частотами $f_1/p[(1-s) \pm ps]$ и определяется $K_{из}$. Величина $K_{из}$ сравнивается с эталонной величиной. И если величина $K_{из}$ превысит порог срабатывания блока 15 то на его выходе и соответствующих входах блока 16 индикации появится сигнал о

повреждении «беличьей клетки» ротора. Если обмотка короткозамкнутого ротора цела, то величина K_{u3} не превышает порог срабатывания блока 15, и сигнал на выходе блока 16 индикации о повреждении обмотки короткозамкнутого ротора будет отсутствовать.

Реализация устройства диагностики повреждения короткозамкнутого ротора может быть различна. В этой работе она осуществляется на базе компьютера типа Notebook в среде Delphi. Поэтому реализация блоков рассматривается с учетом этой особенности.

Блоки коммутации и времени предназначены для обеспечения однократного полного цикла диагностирования. Этот цикл заключается в снятии напряжения $U_{нг}$ в течение времени $t_{дс}$ и $t_{дмп}$ с датчиков скольжения (геркона) и магнитного поля (ТИП). Пуск процесса диагностирования осуществляется кнопкой 14. Время $t_{дс}$ и $t_{дмп}$ выбирается и устанавливается из следующих соображений.

Время $t_{дс}$ должно быть минимально допустимым, но достаточным для надежного определения скольжения ротора. Для измерения скольжения в устройстве используется геркон. Осциллограмма напряжения $U_{нг}$ которого представлена на левой части осциллограммы рисунка 2.14 в виде импульсов постоянного тока. Форма этих импульсов зависит от величины реактивной составляющей в сопротивлении нагрузки $Z_{нг}$, точности срабатывания герконов.

Скольжение ротора можно определить по длительности t_2 одного такого импульса в сравнении с временем t_1 одного периода питающей сети по рисунку 2.14.

Длительность одного импульса, в пределах времени $t_{дс}$ определяется по времени $t_{изм}$ целого числа $n_{изм}$ импульсов. Из этого следует, что средняя длительность одного импульса

$$t_2 = \frac{t_{изм}}{n_{изм}}. \tag{2.24}$$

Так как скорость вращения магнитного поля обмотки статора АД при частоте сети f_1=50 Гц равна $n_1 = 3000/p$, то время его полного оборота

$$t_1 = \frac{60}{n_1} = \frac{p}{50} = \frac{p}{f_1}. \tag{2.25}$$

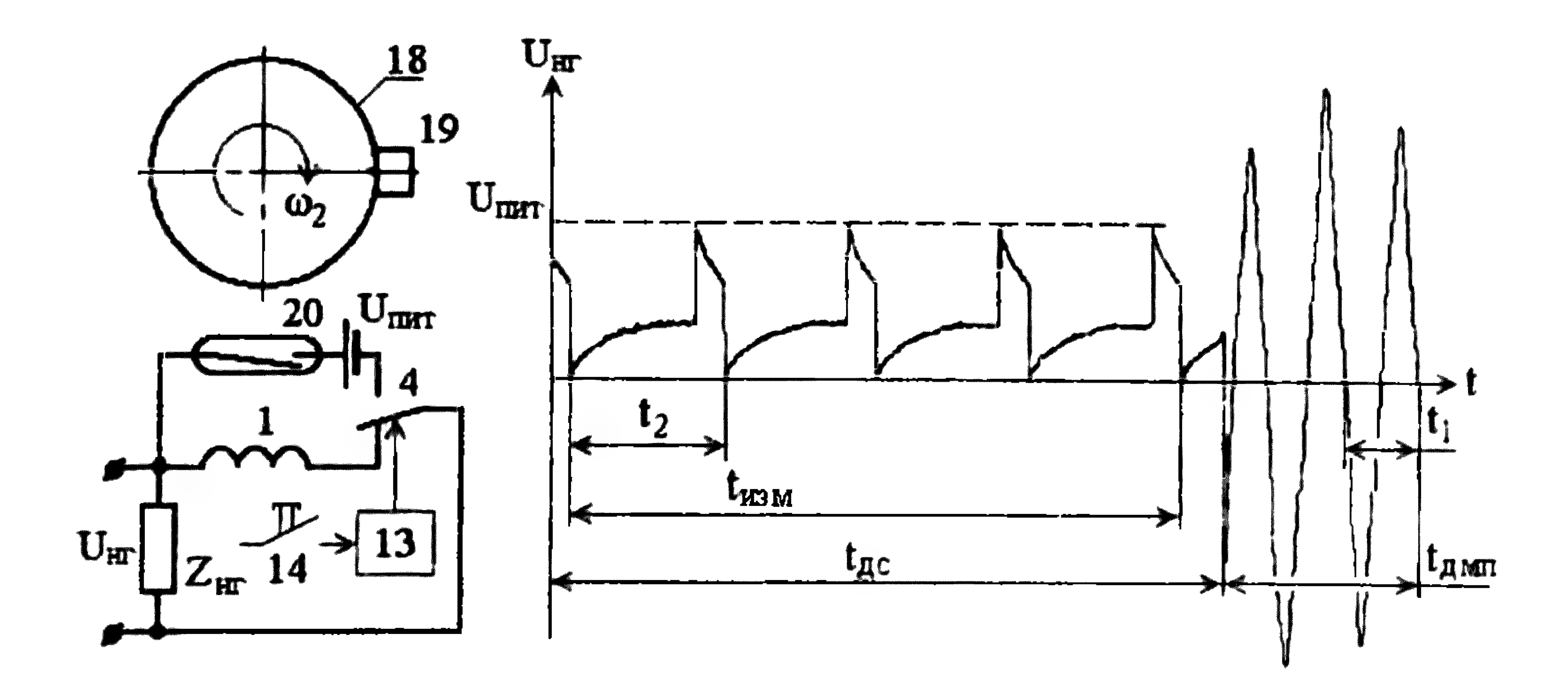


Рисунок 2.14 – Упрощенный вариант схемы подключения ТИП и блока скольжения, а также осциллограмма на их выходе

В результате, скольжение ротора с учетом уравнения (1.3) можно определить как

$$s = \frac{t_2 - t_1}{t_2}.$$

Известно, что герконы имеют некоторый разброс параметров срабатывания [80]. Поэтому, для надежного определения скольжения следует измерять 10–20 импульсов. Исходя из того, что диагностирование производится при скольжении порядка s=0,01–0,05 при $n_{изм}$=10 плюс один импульс надежности включения датчика скольжения, то например, для АД с $p = 2$ время измерения скольжения составит

$$t_{дс} = t_{изм} + t_2 = t_2(n_{изм} + 1) = (11 \div 21)\frac{t_1}{1-s} = 0{,}46 \div 0{,}85\,c.$$

Скольжение ротора с погрешностью δs можно определить путем разложения электрического сигнала $U_{нг} = f(t)$ в ряд Фурье. В результате, скольжение

$$s = \frac{f_1 - pf_г}{f_1},$$

где $f_г$ – частота срабатывания геркона.

Если известен шаг разложения Δf (разрешающая способность) в ряд Фурье, то неточность измерения частоты для определения скольжения в этом спектре в любом случае не превысит одного шага. В этом случае погрешность измерения скольжения в процентах при любом s определяются как

$$\delta s = \frac{\Delta f}{s f_1} 100. \qquad (2.26)$$

Из уравнения видно, что погрешность измерения скольжения по этому способу зависит от величины скольжения ротора АД. Так, при пуске s=1 и шаге Δf=0,1 погрешность измерения скольжения составит δs=0,2 %. В то же время при скольжении в режиме номинальной нагрузки с s=0,01–0,05 погрешность измерения скольжения δs=4–20 %. Так как диагностика возможна только в стационарном режиме, то есть в режиме нагрузки, этот метод даст приемлемые результаты только при Δf=0,005 – 0,01 Гц. Исходя из того, что при шаге Δf=50 Гц требуется время сканирования сигнала 0,02 с, то при шаге Δf=0,1 Гц оно составляет 10 с, а при Δf=0,01 Гц – 100 с.

Выделение основной гармоники сети f_1 и гармонических с частотами $f_1 / p[(1-s) \mp ps)]$ осуществляется путем разложения $U_{нг}$ в ряд Фурье для рассчитанного текущего значения скольжения. Поэтому, минимальное время $t_{дмп,\min}$ необходимое для диагностирования повреждения стержня «беличьей клетки» ротора определяется из условия отставания ротора при скольжении s относительно поля статора на один оборот.

По (2.24) и (2.25) время одного оборота ротора и поля статора АД при скольжении s равно t_2 и t_1 соответственно. Число оборотов ротора и поля статора за время $t_{дмп,\min}$

$$n_2 = t_{дмп,\min} / t_2 \text{ и } n_1 = t_{дмп,\min} / t_1.$$

Так как за минимальное время диагностирования $t_{дмп,\min}$ разница между n_1 и n_2 должна составить один оборот, то

$$n_1 = n_2 + 1 = \frac{t_{дмп,\min}}{t_1} = \frac{t_{дмп,\min}}{t_2} + 1,$$

а

$$t_{дмп,\min} t_2 = t_{дмп,\min} t_1 + t_1 t_2.$$

В результате, минимальное время диагностирования

$$t_{дмп,\min} = \frac{t_1 t_2}{(t_2 - t_1)}. \qquad (2.27)$$

Если принять время одного оборота ротора

$$t_2 = t_1(1-s) = \frac{p}{50}(1-s),$$

то

$$t_{дмп} = \frac{\frac{p}{f}\frac{p}{f}(1-s)}{\frac{p}{f}(1-1+s)} = \frac{p}{f}\frac{(1-s)}{s}. \qquad (2.28)$$

Так при скольжении порядка s=0,01–0,05 для АД с $p = 2$ минимальное время диагностирования должно составлять

$$t_{дмп,\min} = \frac{p}{f}\frac{(1-s)}{s} = \frac{2(1-(0{,}01 \div 0{,}05))}{50((0{,}01 \div 0{,}05)} = (0{,}792 \div 3{,}96)\text{с}.$$

Критерием исправности ротора в системе диагностики являются коэффициенты K_u. Они зависят от скольжения. Пример такой зависимости для АД АОЛ2-11-4 и 4АМ100L6У3 приведен на рисунках 2.9 и 2.12. Так как устройство диагностирования не должно срабатывать при неповрежденном роторе, то порог срабатывания устройства диагностики для любого скольжения определяется с учетом зависимости $K_{u3} = f(s)$ как

$$K_{u3ср} = k_{отс} K_{u3}, \qquad (2.29)$$

где $k_{отс}$ – коэффициент отстройки, принимается по [8] как у токовых защит равным 1,15.

На рисунке 2.15 зависимости $K_{u3} = f(s)$ и $K_{u3ср} = f(s)$ показаны линиями 1 и 2. В то же время линией 3 ($K_{u4} = f(s)$) определена граница срабатывания устройства при обрыве одного стержня. Таким образом, область, расположенная между линиями $K_{u3ср} = f(s)$ и $K_{u4} = f(s)$ (линии 2 и 3) определяет частичное повреждение «беличьей клетки» ротора на момент диагностики. На рисунке 2.15 эта область заштрихована. Если при текущем значении скольжения коэффициент исправности K_{u3} превысит значение K_{u4}, это говорит об обрыве стержня.

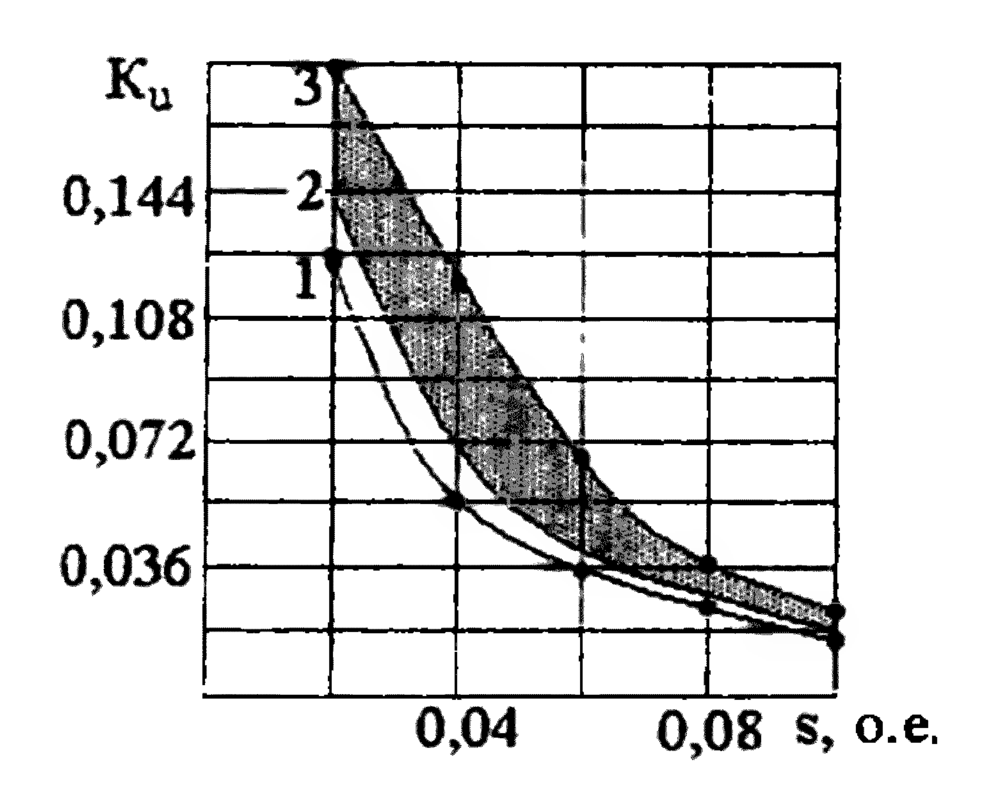


Рисунок 2.15 – Область выбора критерия исправности стержней ротора АД АОЛ2-11-4

Зависимость $K_{u3ср} = f(s)$ и $K_{u4} = f(s)$ для других типов АД можно получать экспериментальным путем на заведомо неповрежденном АД или рассчитывать по выражениям (2.12) – (2.20). Первый путь удобен при использовании устройства диагностики для контроля качества значительного количества однотипных АД на заводах, изготавливающих эти АД. При этом вновь изготавливаемые АД должны при реализации снабжаться зависимостью $K_{u3} = f(s)$, как частью их паспортных данных.

Аналогичный путь приемлем на предприятиях, где эксплуатируется много однотипных АД, например на ТЭЦ и ГРЭС.

Расчетный путь получения зависимости $K_{u3} = f(s)$ и $K_{u4} = f(s)$ более сложен и для предприятий использующих АД различных типов

целесообразно использовать его только для особо важных двигателей.

2.5 Способ диагностики повреждения короткозамкнутого ротора на точечных индукционных преобразователях

Реализация способа диагностики повреждения короткозамкнутого ротора с герконом сопряжена с некоторыми сложностями. Во-первых, необходима временная установка на каждый диагностируемый двигатель датчика измерения скольжения. Во-вторых, чувствительность устройства диагностики иногда оказывается недостаточной для обнаружения повреждения в «беличьей клетке».

От первого недостатка можно избавиться, если не измерять скольжение, а определять в зоне перемещения в соответствии с рисунком 2.16 параметры гармонических ЭДС.

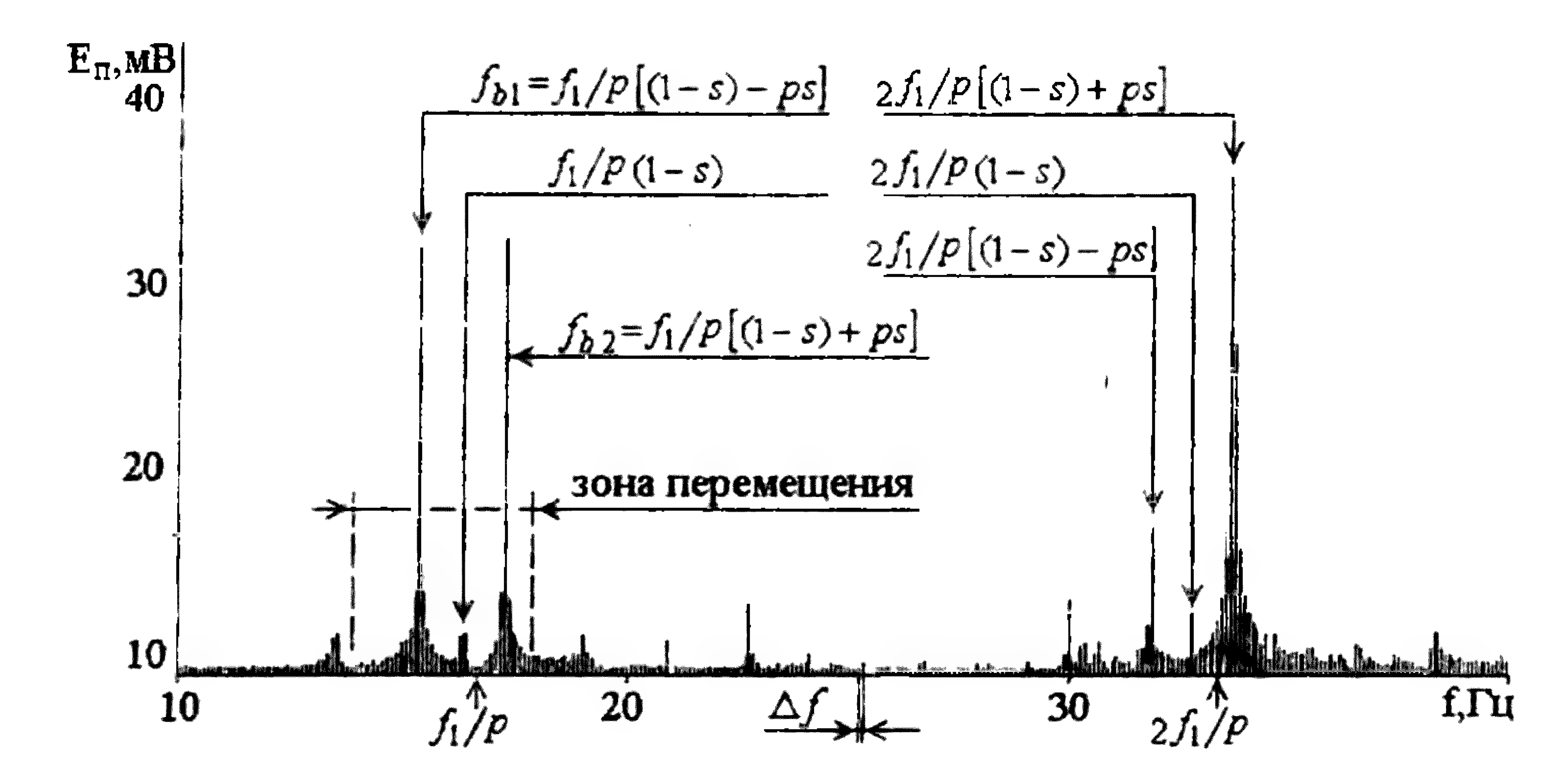


Рисунок 2.16 – Фрагмент спектра гармонических ЭДС ТИП двигателя 4АМ100L6У3 при $s = 0{,}0192$

На спектре ЭДС ТИП гармонические ЭДС с частотами $f_1/p[(1-s)\mp ps]$, в этой зоне имеют наибольшие амплитуды. Зона перемещения на этом спектре ограничена частотами $f_1/p[(1-s_n)\mp ps_n]$, где s_n – номинальное скольжение ротора АД по паспортным данным. Повысить чувствительность вдвое легко за счет использования двух ТИП.

Этот способ, с учетом [10] и [81], отличается от предыдущего тем, что с помощью расположенных диаметрально и включенных

встречно ТИП измеряется не внешнее многополюсное поле АД, а внешнее поле АД с $2p=2$. Поэтому диагностика повреждения «беличьей клетки» осуществляется следующим образом. Первоначально, в соответствии с рисунком 2.17, в течение времени t_{en1} измеряется сигнал одного ТИП и в течение времени t_{en2} сигнал с включенных встречно ТИП. Затем из сигнала с одного ТИП путем разложения в ряд Фурье выделяется E_{n1} ЭДС основной гармонической сети с частотой f_1, а из сигнала с двух ТИП – ЭДС с частотами $f_1/p[(1-s)\mp ps]$.

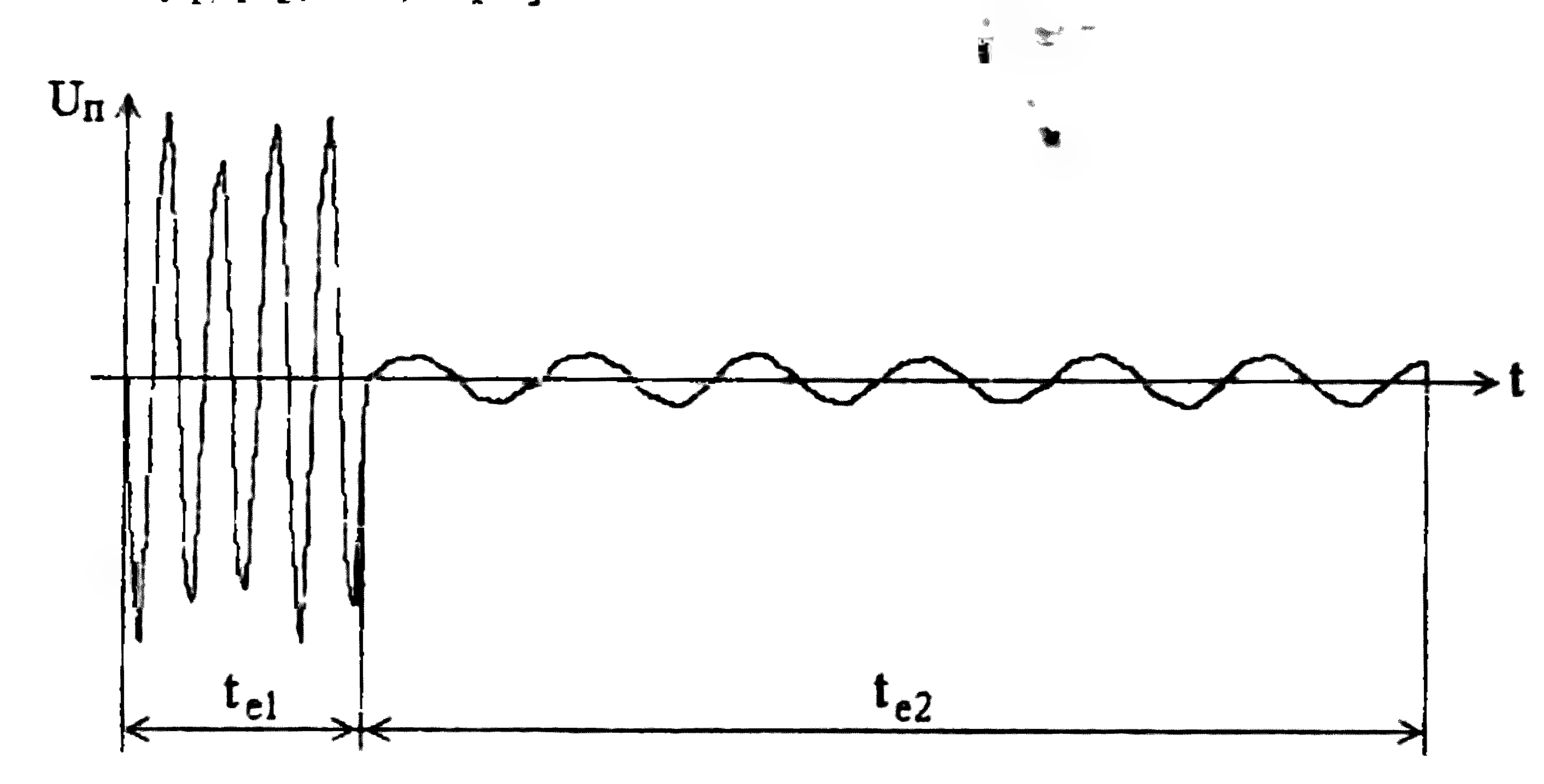


Рисунок 2.17 – Осциллограмма на выходе измерительного щупа с двумя ТИП при диагностировании «беличьей клетки»

По ним определяется скольжение по параметрам гармонических ЭДС с частотами $f_1/p[(1-s)\pm ps]$ и текущее значение коэффициента $K^{*}_{u3}=(E_{n2\partial 1}+E_{n2\partial 2})/(\dot{E}_{n1}+\dot{E}_{n2})$. В пороговом элементе $\hat{E}^{*}_{u3}$ сравнивается с порогом срабатывания K_{u3cp} при полученном скольжении. Если окажется что $\hat{E}^{*}_{u3}<K_{u3cp}$, то блок индикации выдаст информацию РОТОР ЦЕЛ. Если $K_{u3cp}<\hat{E}^{*}_{u3}<\hat{E}_{u4}$, то блок индикации выдает информацию ЧАСТИЧНЫЙ ОБРЫВ СТЕРЖНЯ. Если $\hat{E}^{*}_{u3}>\hat{E}_{u4}$, то блок индикации покажет ОБРЫВ СТЕРЖНЯ.

На рисунке 2.18 приведена блок-схема этого устройства, где ТИП 1и 2 АД 3 подключают к блоку 4 балансировки ЭДС этих ТИП и далее к первому входу 5 блока 6 коммутации. Ко второму входу 7 блока 6 коммутации подключается блок 8 времени. Выход блока 6 коммутации через блок 9 памяти подключен к блоку 10 разложения

ЭДС ТИП на гармонические составляющие. Блок 10 в свою очередь подключен к блоку 11 определения скольжения и коэффициента $K_{и3ср}$. Выход блока 11 через пороговый элемент 12 подключен к блоку 13 индикации. Работой блока 6 управляет блок 8 времени, который и запускает в работу устройство диагностики ключом 14. Включение и отключение машины от сети осуществляется выключателем 15. Блоки 4, 6, 8 и 9 размещают на измерительном щупе, остальные реализуются в компьютере.

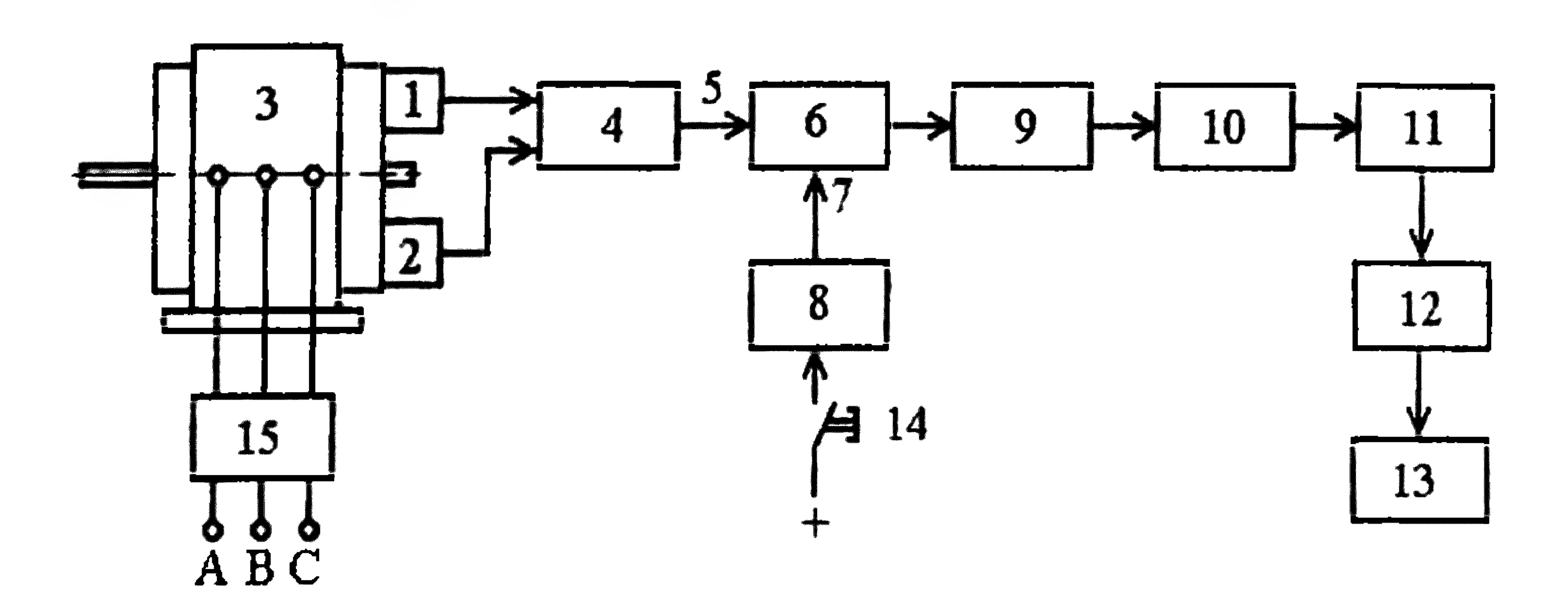


Рисунок 2.18 – Блок схема устройства диагностики повреждения, реализующего способ диагностики повреждения «беличьей клетки» на ТИП

Так как диаметрально расположенные ТИП имеют неодинаковое число витков и неточно установлены, а АД имеет на внешней поверхности различные несимметричные ферромагнитные элементы, то ЭДС этих ТИП от внешних магнитных полей не равны по величине. Для устранения этого недостатка используется блок 4 балансировки. Один из вариантов его упрощенной схемы приведен на рисунке 2.19.

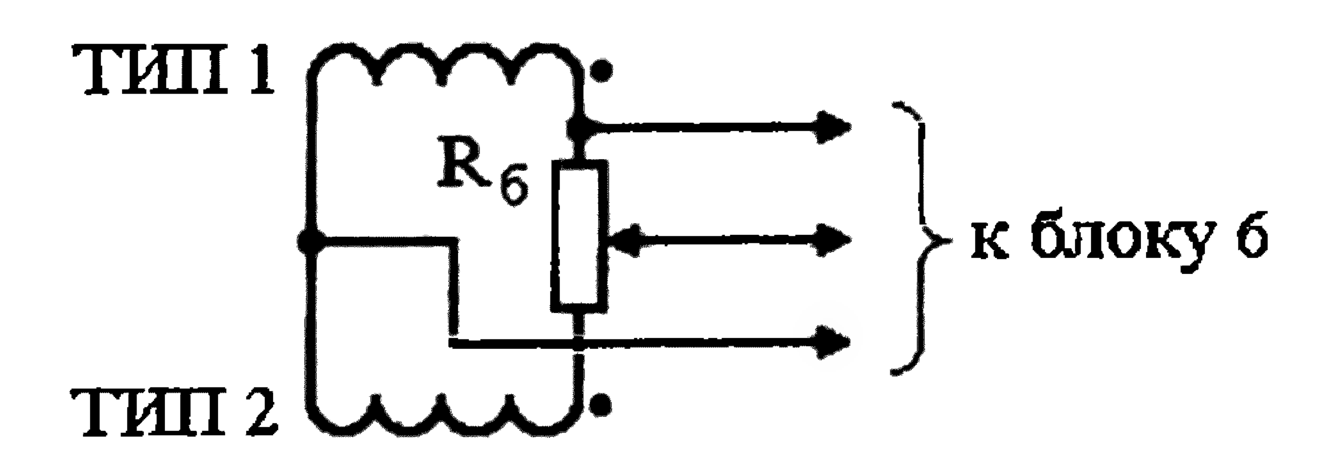


Рисунок 2.19 – Упрощенная схема блока балансировки

Блок 6 коммутации выполнен в виде электромагнитного реле, работой которого управляет реле времени. Ко второму входу 7 блока 6 коммутации подключается блок 8 времени. Основная его задача заключается в обеспечении своевременной подачи сигналов от одного и двух ТИП на вход блока 9, в котором происходит их запись. Время записи, в соответствии с рисунком 2.17, определено значениями t_{el} и t_{e2}.

Запись ЭДС сигнала с одного ТИП используется для определения величины основной гармонической сети с частотой f_1. В идеале для этого достаточно времени t_{el} равного одному периоду сети.

Реально, из-за колебаний амплитуды ЭДС ТИП, вызванных различными причинами, время записи t_{el} следует принимать равным 0,1 – 0,5 с.

ЭДС от каждого из ТИП, индуцированные магнитными полями статора, ротора и поврежденного стержня, с учетом уравнений (2.18), (2.19) и (2.26) соответственно равны

$$E_{mun1} = 2\pi f_1 \left\{ B_{z1} + \frac{1}{p} B_{z2} + \frac{1}{p} B_{z2э} \left[(1-s) \pm ksp \right] \right\} s_n w_n ;$$
$$E_{mun2} = 2\pi f_1 \left\{ B_{z1} + \frac{1}{p} B_{z2} - \frac{1}{p} B_{z2э} \left[(1-s) \pm ksp \right] \right\} s_n w_n \qquad (2.30)$$

У диаметрально расположенных ТИП, обмотки которых соединяются встречно – последовательно, результирующая ЭДС определяется как сумма их ЭДС. В результате

$$E_{en2} = 2\pi f_1 \left\{ \frac{2}{p} B_{z2э} \left[(1-s) \pm ksp \right] \right\} s_n w_n . \qquad (2.31)$$

То есть, в идеальных условиях результирующая ЭДС не будет иметь ЭДС от магнитных полей статора и ротора. В то же время, ЭДС от поля поврежденного стержня удвоится. Таким образом, чувствительность устройства значительно возрастает. Следует добавить, что такое включение позволяет почти полностью отстроиться от внешних магнитных полей.

Время t_{e2} записи ЭДС E_{en2} определено величиной шага Δf разложения в ряд Фурье и определяется как

$$t_{e2} = k_{omc} \frac{1}{\Delta f}, \qquad (2.32)$$

где k_{omc} - коэффициент отстройки равный 1,15 – 1,3.

Таким образом, если принять Δf=0,1 Гц, а коэффициент k_{omc}=1,3, то t_{e2} составит 13 с.

Скольжение определяется по частоте двух гармонических ЭДС наибольшей величины в зоне перемещения ограниченной частотами $f_1/p[(1-s_n) \mp ps_n]$. Эти гармонические имеют частоты $f_1/p[(1-s) \pm ps)]$. В этом случае разность их частот и скольжение будут равны

$$\Delta f_b = \frac{f_1}{p}[(1-s)+ps)] - \frac{f_1}{p}[(1-s)-ps)] = f_1/p\ 2s,\ \text{а}\ s = \frac{p\Delta f_b}{2f_1}. \qquad (2.33)$$

Очевидно, возможны и другие варианты определения скольжения с использованием гармонических частот, отмеченных на рисунке 2.16.

Погрешность определения скольжения δs в этом случае находится из следующих соображений. Разложение ЭДС ТИП в ряд Фурье осуществляется дискретно с шагом разложения Δf. Именно эта величина и задает относительную погрешность измерения Δf_b, которая определяется соотношением

$$\delta s = \Delta f / \Delta f_b.$$

Так по рисунку 2.16 для первой зоны при Δf=0,1Гц, $s = 0{,}0192$, f_{b2}=17,3 Гц и f_{b1}=15,38 Гц погрешность измерения скольжения составит

$$\delta s = \frac{\Delta f}{f_{b2} - f_{b1}} = \frac{0{,}1}{17{,}3 - 15{,}38} = 0{,}052.$$

Как показали многочисленные эксперименты этого вполне достаточно, для надежного диагностирования. Несомненно, погрешность определения снижается при увеличении скольжения. Так при номинальном скольжении ротора АД 4АМ100L6У3 $\delta s \approx$ 0,022.

Исходя из этого, диагностику следует проводить в режиме максимально допустимой нагрузки.

2.6 Выводы

а) Предлагаемый метод формирования системы уравнений математической модели АД прост и позволяет существенно упростить традиционную математическую модель АД с фазовыми координатами за счет уменьшения в полтора раза числа ее дифференциальных уравнений.

б) Полученная математическая модель позволяет с точностью 15-20% моделировать практически все эксплуатационные режимы как неповрежденного АД, так и при обрыве одного или нескольких стержней его «беличьей клетки».

в) Теоретические и экспериментальные исследования показали, что спектр ЭДС ТИП в диапазоне частот от 0 до f_1 разбит на $(p-1)$ областей измерения, частоты и амплитуды дополнительных гармонических $E_{n2д}$ которых в наибольшей степени изменяются при повреждении стержней и не зависят от неравномерности нагрузки.

г) В качестве критерия исправности ротора АД можно использовать как изменение амплитуды гармонических с частотами $[(1-s)\mp ps]if_1/p$ в i-ой области измерения, так и их отношение к основной гармонике сети с частотой f_1 в виде коэффициентов K_{u1} и K_{u3}. Причем первые в защитах, а вторые в системах диагностики.

д) Для реализации способа диагностики повреждения «беличьей клетки» с герконом необходима зависимость $K_{u3}=f(s)$, которая получается экспериментальным или расчетным путем и позволяет достаточно надежно определять этот вид повреждения.

е) При реализации способа диагностики повреждения «беличьей клетки» на точечных индукционных преобразователях скольжение ротора определяется по разности гармонических с частотами $[(1-s)\mp ps]f_1/p$, а зависимость $K_{u3}=f(s)$ - по отношению суммы этих гармонических к величине основной гармоники сети с частотой f_1 одного из ТИП.

3 Практические аспекты построения систем диагностики

3.1 Моделирование магнитных полей в торцевой зоне

Проектирование ТИП системы диагностики опирается на моделирование магнитных полей в торцевой зоне электрических машин и сводится к решению классической задачи [83] о нахождении распределения магнитного поля проводников в призматическом ферромагнитном канале. Для этого электрическую машину разворачивают в тангенциальном направлении [84] и принимают схему торцевой зоны, показанную на рисунке 3.1,а, где 1 – лобовая часть обмотки статора, 2 – обмотка ротора, 3 – ТИП системы диагностики. Корпус 4 и подшипниковый щит 5 выполнены из ферромагнитных материалов. Известно множество решений этой задачи. По ряду причин, изложенных в [85], для этого типа задач предпочтение следует отдать методу зеркальных отражений с коррекцией токов.

При использовании ТИП [86] магнитные поля статора и ротора АД моделируют от тангенциальной составляющей тока в них. В этом случае метод зеркальных отражений с коррекцией токов предлагается использовать следующим образом [87].

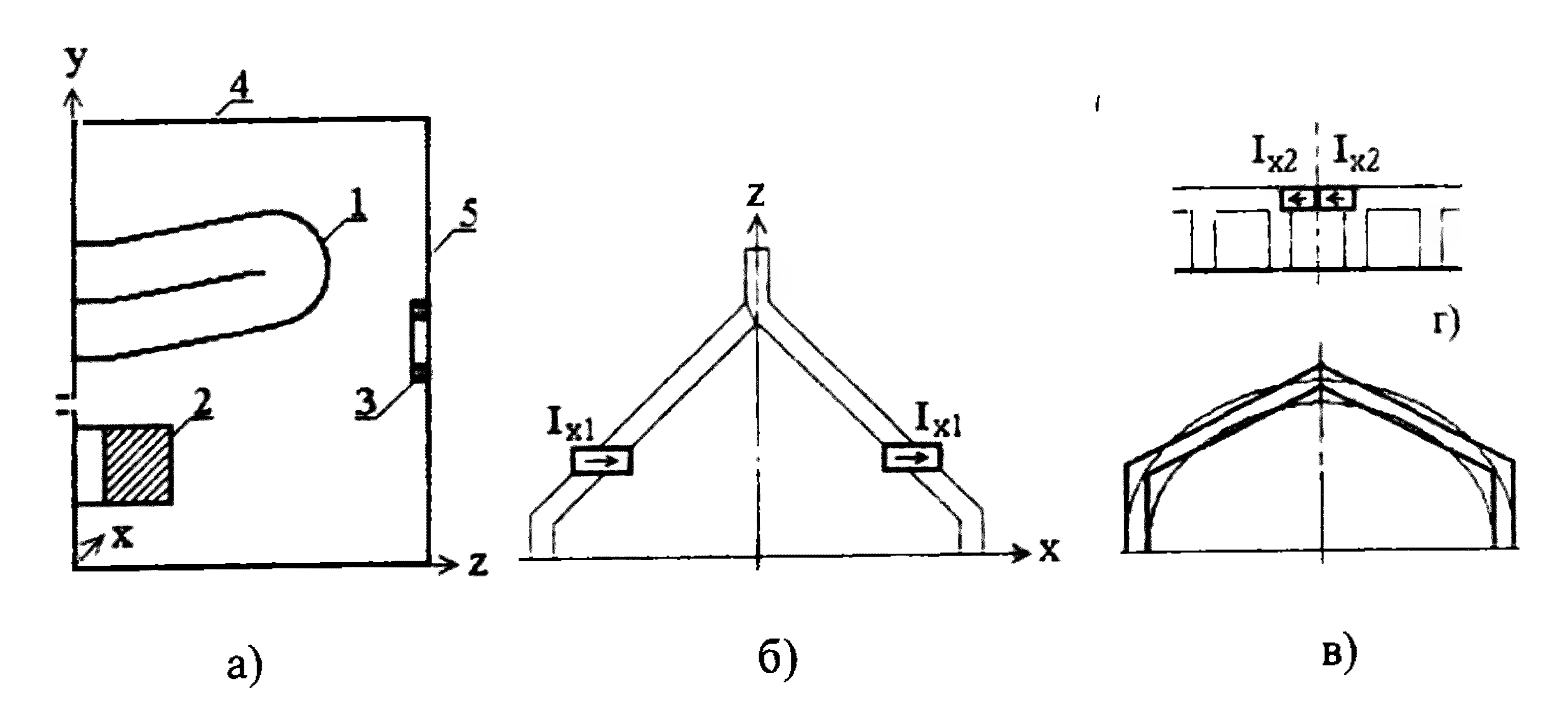


Рисунок 3.1 – Схема торцевой зоны и форма лобовой части секции статора и ротора АД

Конфигурация лобовой части обмоток статора и короткозамкнутого ротора АД показана на рисунке 3.1. Из нее ясно, что для моделирования магнитного поля секции статора и элемента

обмотки ротора требуется иная, чем в [85], система проводников с током.

Наиболее характерна для всех электрических машин секционированная обмотка. Такие обмотки применяют при изготовлении статора и фазного ротора мощных машин. Лобовая часть ее секций показана на рисунке 3.1,б тонкой линией. Ее можно считать симметричной относительно оси X в плоскости XZ, если допустить, что координаты y верхней и нижней ее ветвей равны. Тогда в расчетах лобовую часть секции можно представить в виде нескольких пар элементов [86] с токами, одна из которых показана на рисунке 3.1,б толстой линией.

На электрических машинах малой мощности применяют всыпные обмотки, форма лобовой части которых показана на рисунке 3.1,в тонкой линией. При моделировании полей лобового рассеяния, ее упрощают и приводят к виду секционированной обмотки, как показано на рисунке 3.1,в толстой линией. Такое упрощение, как правило, не приводит к значительным погрешностям, но упрощает моделирование магнитных полей.

В АД с «беличьей клеткой» все части короткозамкнутого кольца между стержнями представляются также в виде двух элементов с токами, как показано на рисунке 3.1,г.

Для моделирования магнитного поля пары симметрично расположенных элементов с током I_x используется расчетная схема, показанная на рисунке 3.2.

Если тангенциальная составляющая токов I_x пары симметричных проводников совпадает или не совпадает по направлению, то в этом случае радиальная и аксиальная составляющие индукции магнитного поля i,j-го отражения по [85] с учетом [88] определяются как

$$B_{y(i,j)} = \frac{I_{x(i,j)}\mu_0}{4\pi b_{1(i,j)}}\left(\frac{r_1}{d_{1(i,j)}} - \frac{r_2}{d_{2(i,j)}} \pm \frac{r_3}{d_{3(i,j)}} \mp \frac{r_4}{d_{4(i,j)}}\right)\frac{z_j K_y}{b_{1(i,j)}}, \quad (3.1)$$

$$B_{z(i,j)} = \frac{I_{x(i,j)}\mu_0}{4\pi b_{1(i,j)}}\left(\frac{r_1}{d_{1(i,j)}} - \frac{r_2}{d_{2(i,j)}} \pm \frac{r_3}{d_{3(i,j)}} \mp \frac{r_4}{d_{4(i,j)}}\right)\frac{y_i K_z}{b_{1(i,j)}}. \quad (3.2)$$

Коэффициенты в выражениях (3.1)–(3.2) определяются по формулам

$$b_{l(i,j)} = \sqrt{(y_i - y)^2 + (z_j + z)^2},$$

$$r_1 = x_0 + \frac{l_x}{2} + x,\ d_{1(i,j)} = \sqrt{r_1^2 + b_{l(i,j)}^2},\ r_2 = x_0 - \frac{l_x}{2} + x,$$

$$d_{2(i,j)} = \sqrt{r_2^2 + b_{l(i,j)}^2},$$

$$r_3 = x_0 + \frac{l_x}{2} - x,\ d_{3(i,j)} = \sqrt{r_3^2 + b_{l(i,j)}^2},\ r_4 = x_0 - \frac{l_x}{2} - x,$$

$$d_{4(i,j)} = \sqrt{r_4^2 + b_{l(i,j)}^2},$$

где y_i, z_j – координаты i, j-го отражения проводника вдоль осей Y и Z соответственно;

y, z – координаты точки, в которой определяются аксиальная $B_{z(i,j)}$ и радиальная $B_{y(i,j)}$ составляющие индукции магнитного поля отражений;

l_x – длина проводника, вдоль которого разворачивается машина (рисунок 3.2);

K_y, K_z, – коэффициенты коррекции для токов крайних отражений [85] при расчете B_y и B_z соответственно.

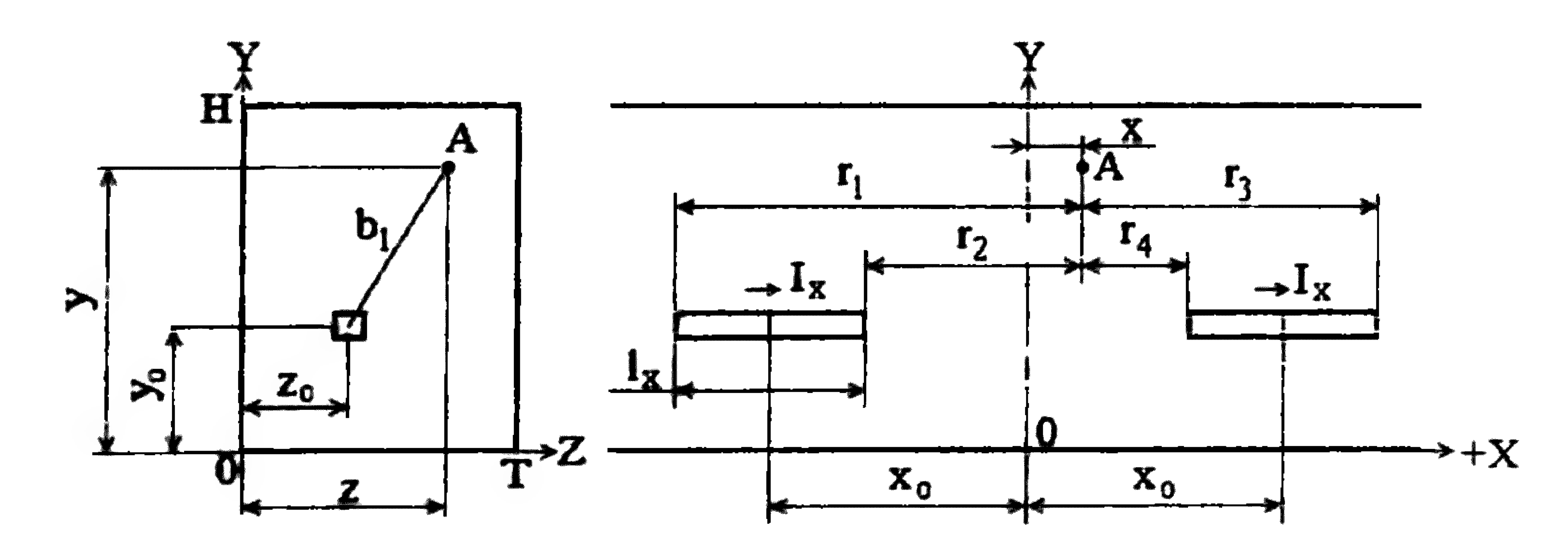


Рисунок 3.2 – Расчетная схема призматического канала с парой симметричных проводников

Тогда в точке A с координатами x, y и z радиальная и аксиальная индукция магнитного поля определяются

$$B_y = \sum_i \sum_j B_{y(i,j)};\quad B_z = \sum_i \sum_j B_{z(i,j)}. \qquad (3.3)$$

Если принять, что магнитная проницаемость ферромагнитных элементов $\mu_c = \infty$, то величина тока для любого отражения

$$I_{x(i,j)} = I_x .$$

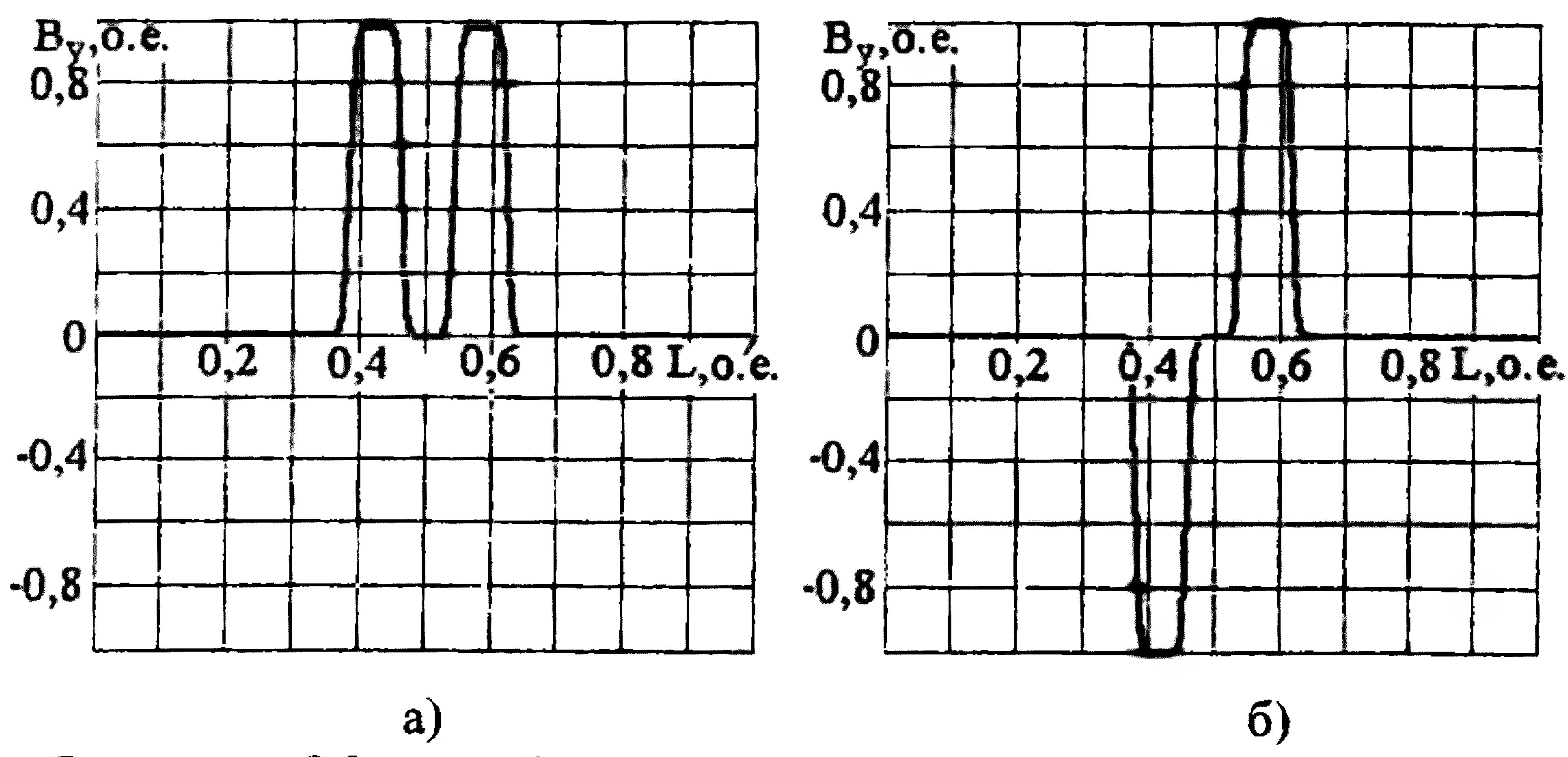
При расчете B_z в областях $0 < y < y_0$ и $y_0 < y < H$ по рисунку 3.2 коэффициент коррекции определяют как

$$K_z = \frac{y}{0{,}5H} \text{ и } K_z = \frac{H-y}{0{,}5H}. \quad (3.4)$$

В то же время, при расчете составляющей магнитного поля B_y в областях $0 < z < z_0$ и $z_0 < z < T$, коэффициент коррекции

$$K_y = \frac{z}{0{,}5T} \text{ и } K_y = \frac{T-z}{0{,}5T}. \quad (3.5)$$

По [85], коррекцию токов при моделировании составляющих B_y и B_z нужно осуществлять раздельно. Пример моделирования радиальной составляющей магнитного поля пары симметричных проводников с токами I_x, совпадающими и не совпадающими по направлению, длиной l_x с $x_0 = l_x$, ось симметрии которых приходится на середину призматического канала длиной $L = 10l_x$, с размерами $T=1$ и $H=1$, показаны на рисунке 3.3,а и рисунке 3.3,б.



а) б)

Рисунок 3.3 – Результаты моделирования поля двух симметричных проводников

Моделирование магнитного поля лобового рассеяния обмотки статора и ротора для нужд системы диагностики осуществляется в симметричном нагрузочном режиме с целым и поврежденным ротором.

Магнитное поле лобового рассеяния обмотки статора с учетом [86] моделируют следующим образом. Первоначально рассчитывают магнитное поле одного витка секции статора с током $I_{1вит}$=1 А. Размеры проводника должны соответствовать размерам секции статора в изоляции. Затем по известному распределению магнитного поля этого витка, месту расположения секций в сердечнике статора, а также числу витков и току в каждой из секций методом суперпозиции моделируется магнитное поле лобовой части обмотки статора в торцевой зоне.

В лобовой части витка секции выделяют только отогнутую часть, так как именно в ней есть тангенциальная составляющая тока. При расчете ее магнитного поля ось симметрии лобовой части витка секции совмещается с началом координат, как показано на рисунке 3.4.

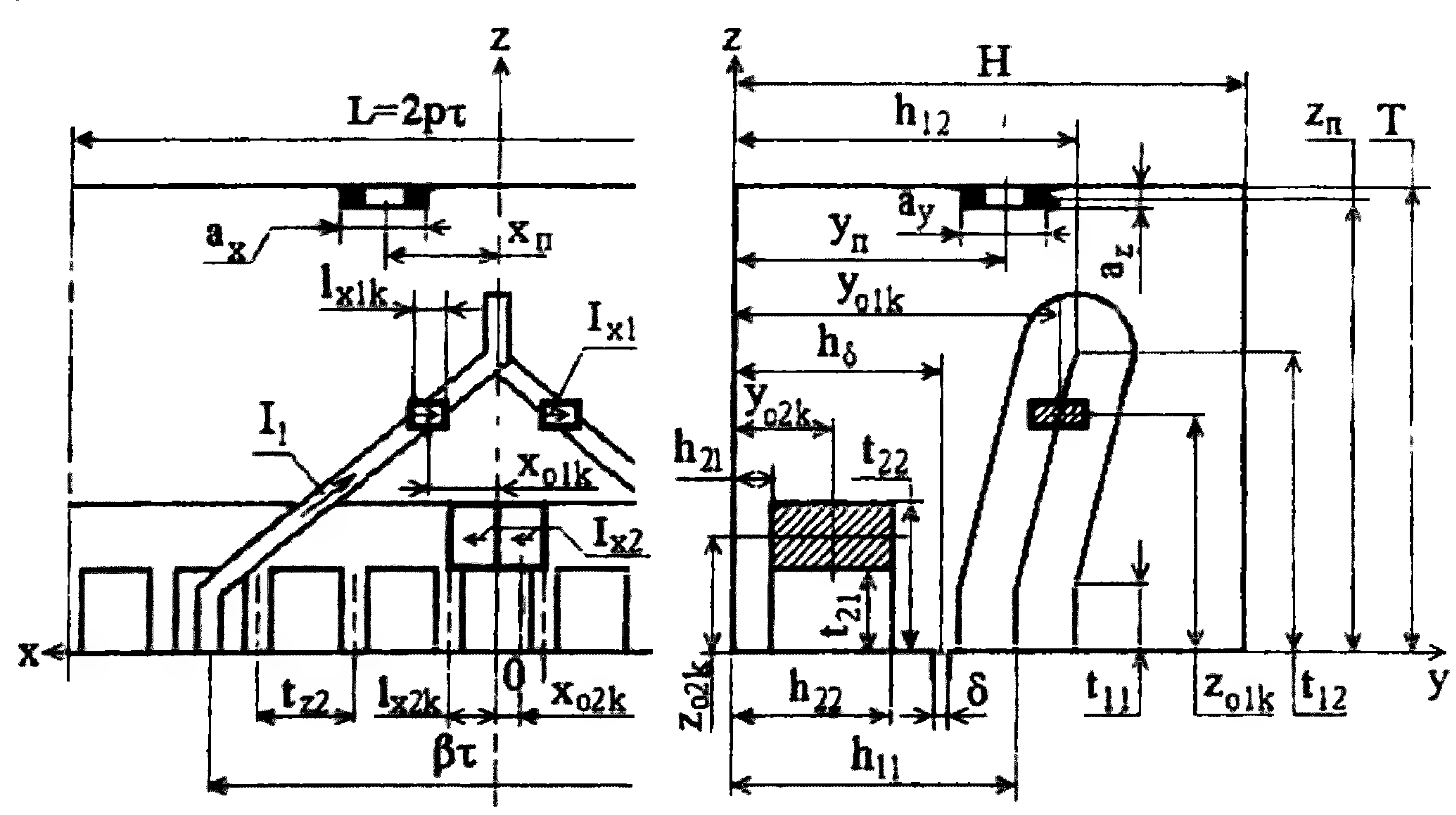


Рисунок 3.4 – Схема для расчета полей секции статора и элемента короткозамыкающего кольца ротора АД

Отогнутую часть разбивают на K пар симметричных относительно оси элементов длиной l_{x1k} вдоль оси X. Одна из таких пар элементов выделена на рисунке 3.4. В расчетах следует принимать

K=4–8. Из геометрических соображений размеры и место расположения k - ой пары элементов определяется как

$$l_{x1k}=\frac{\beta\tau}{2K},\quad x_{o1k}=\frac{\beta\tau}{2K}(k-0{,}5),\quad y_{o1k}=h_{11}+\frac{(h_{12}-h_{11})}{K}(k-0{,}5),$$

$$z_{o1k}=t_{11}+\frac{(t_{21}-t_{11})}{K}(k-0{,}5) \qquad (3.6)$$

где β – коэффициент укорочения обмотки статора.

По (3.3) радиальная и аксиальная составляющие индукции магнитного поля от K пар элементов отогнутой лобовой части витка секции

$$B_{y1,вит}(x)=\sum_k B_{y1k}(x);\qquad B_{z1,вит}(x)=\sum_k B_{z1k}(x), \qquad (3.7)$$

где $B_{y1k}(x)$ – распределение радиальной составляющей индукции магнитного поля от k-й пары элементов лобовой части витка секции вдоль развертки статора, которое определяется по (3.1);

$B_{z1k}(x)$ – распределение аксиальной составляющей индукции магнитного поля от k-й пары элементов лобовой части витка секции вдоль развертки статора, которое определяется по (3.2).

На рисунке 3.5,а приведены зависимости (3.7) в виде кривых 1 и 2 для одного витка секции статора АД 4АМ100L6У3 в торцевой зоне вдоль его развертки в относительных единицах, которые получены с учетом данных приложения Б.

Сопоставление этих результатов с результатами моделирования по методу Данилевича [84] показало, что они различаются не более чем на 2–5 %.

По известным зависимостям $B_{y1,вит}(x)$ и $B_{z1,вит}(x)$, месту расположения i - ой секции на сердечнике статора, числу витков w_i и току I_i в ней распределение радиальной и аксиальной составляющих магнитного поля лобового рассеяния обмотки статора вдоль его развертки для произвольного значения времени определяется как

$$B_{y1}(x)=\sum_{i=1}^{z1} I_i w_i B_{y1,вит}(x) \text{ и } B_{z1}(x)=\sum_{i=1}^{z1} I_i w_i B_{z1,вит}(x) \qquad (3.8)$$

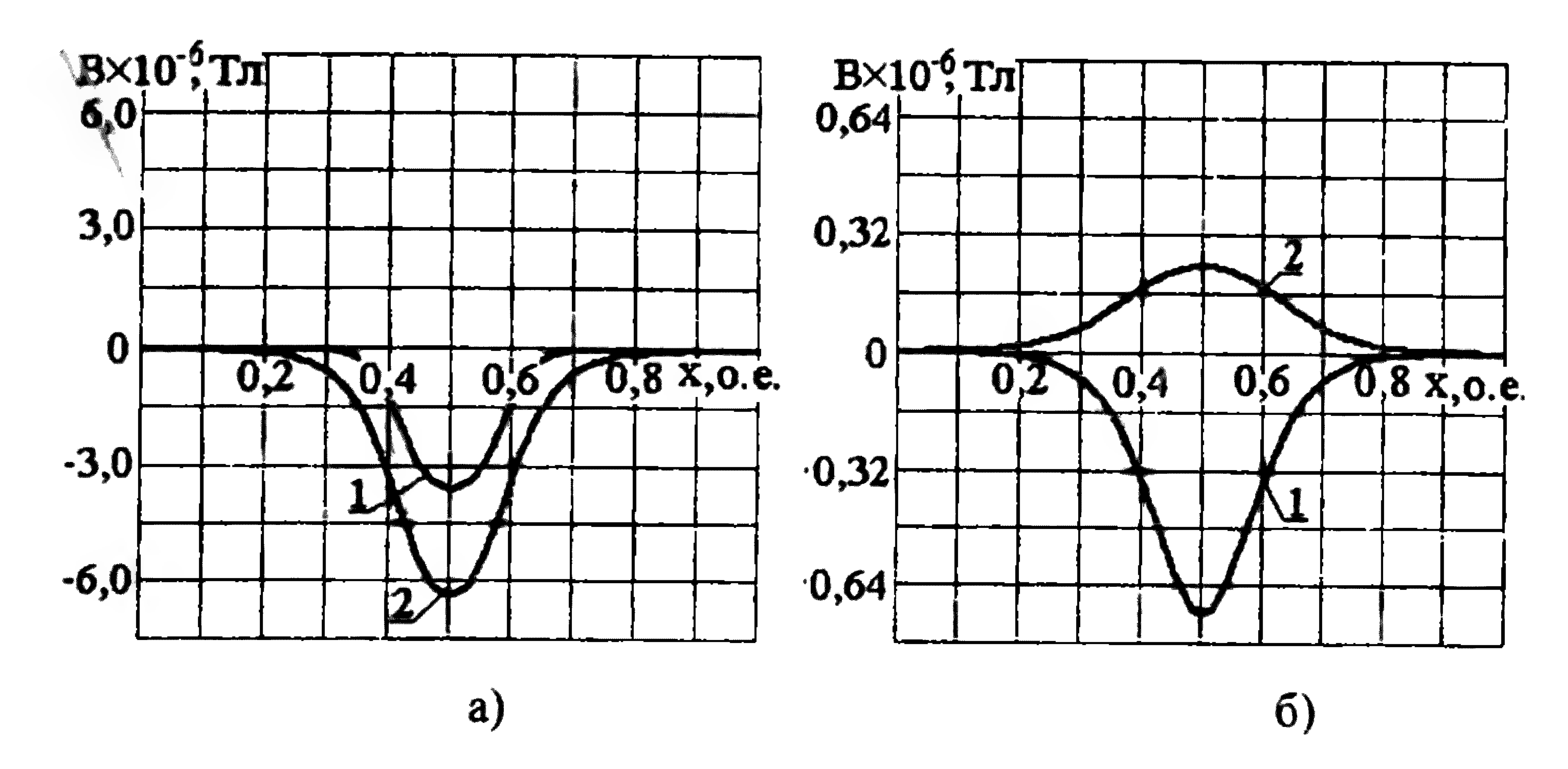


Рисунок 3.5 – Характер распределения вдоль развертки поля лобового рассеяния одной секции обмотки статора и элемента кольца ротора АД 4АМ100L6У3

Распределение аксиальной составляющей магнитного поля лобового рассеяния обмотки статора АД 4АМ100L6У3 вдоль его развертки при координатах Y=0,036м и Z=0,052м для времени t=0 по данным приложения показано на рисунке 3.6,а, где кривые 1 и 2 построены при токе в фазе $I_н$=5,6 А в симметричном режиме и при обрыве фазы С.

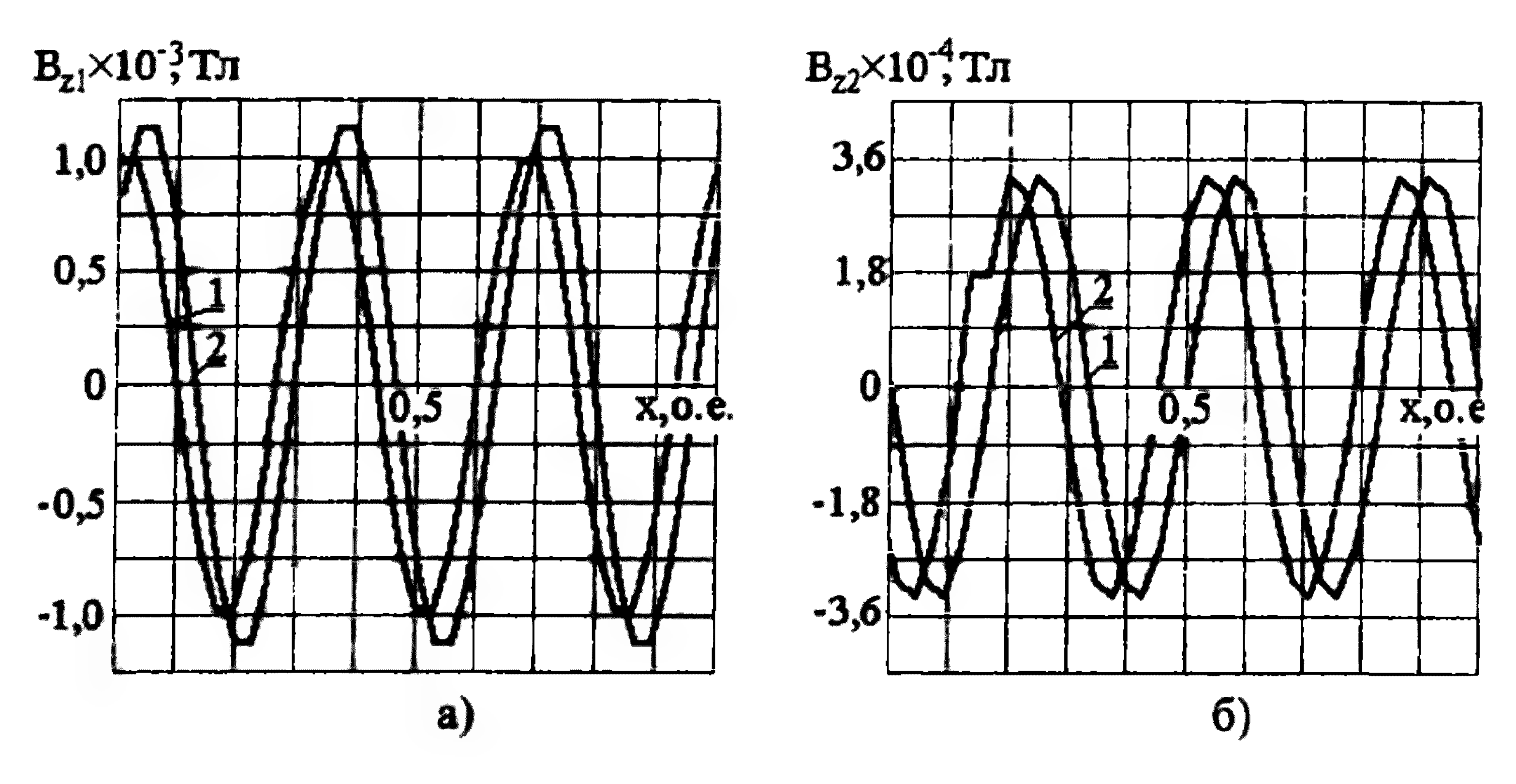


Рисунок 3.6 – Распределение полей лобового рассеяния от токов в обмотке ротора и статора АД 4АМ100L6У3

Магнитное поле лобового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора АД в эксплуатационных режимах работы и при обрыве стержня представляется в виде суммы магнитных полей от токов в элементах короткозамыкающего кольца в этих режимах. Поэтому, первоначально определяют магнитное поле лобового рассеяния от элемента короткозамыкающего кольца с током $I_{2,вит}$=1 А. Затем, по известному распределению магнитного поля элемента, месту расположения элементов вдоль развертки АД и току в них методом суперпозиции моделируют магнитное поле всей обмотки ротора.

Каждый элемент кольца заменяется парой симметричных проводников с током $I_{x2}(x)$. Размеры и место расположения k - й пары проводников с учетом рисунка 3.4 определяются

$$t_{z2} = \frac{L}{z_2}; \; l_{x2k} = \frac{t_{z2}}{2}(k-0{,}5); \; x_{o2k} = \frac{l_{x2k}}{2}; \; y_{o2k} = \frac{h_{22}-h_{21}}{2};$$

$$z_{o2k} = \frac{(t_{12}-t_{11})}{2} \qquad (3.9)$$

На рисунке 3.5,б приведены кривые 1 и 2 распределения аксиальной и радиальной составляющих магнитного поля элемента кольца ротора АД 4АМ100L6У3 в торцевой зоне вдоль его развертки в координатах Y=0,036 м и Z=0,052 м.

По известным зависимостям $B_{y2}=f(x)$ и $B_{z2}=f(x)$ при фиксированных значениях y и z, току в элементах кольца ротора $I_2(x)$ при фиксированном значении t, а также по известному расположению этих элементов, легко рассчитать распределение радиальной и аксиальной составляющих индукции магнитного поля целого и поврежденного ротора вдоль развертки по уравнениям

$$B_{y2}(x) = \sum_{j=1}^{z_2} I_{x2j} B_{y2}(x) \text{ и } B_{z2}(x) = \sum_{j=1}^{z_2} I_{x2j} B_{z2}(x). \qquad (3.10)$$

На рисунке 3.6,б приведено распределение вдоль воздушного зазора аксиальной составляющей магнитного поля целого поврежденного ротора АД 4АМ100L6У3 с координатами Y=0,036 м и Z=0,052 м при обрыве одного стержня (кривые 1 и 2) в режиме номинальной нагрузки.

Как правило, при проектировании устройств на встраиваемых индукционных преобразователях в качестве измеряемого параметра

чаще всего используют только одну составляющую магнитного поля, пренебрегая другими. Это значительно упрощает выражения и сокращает время моделирования.

3.2 Моделирование магнитного поля на внешней стороне подшипникового или торцевого щита

Датчики переносной системы при диагностировании повреждения ротора обычно размещают на внешней стороне подшипникового или торцевого щита. Поэтому для моделирования ЭДС датчика в режиме диагностики требуется знать распределение внешнего магнитного поля в этой области.

Внешнее магнитное поле АД обусловлено токами в проводниках лобовых и пазовых частей обмоток статора и ротора, а также конфигурацией ферромагнитных элементов АД. Его точное моделирование в режиме диагностики достаточно сложно [89, 90]. Поэтому предлагается моделировать это поле приближенно следующим образом.

На рисунке 3.7,а приведена схема приближенного распределения внешнего магнитного поля АД.

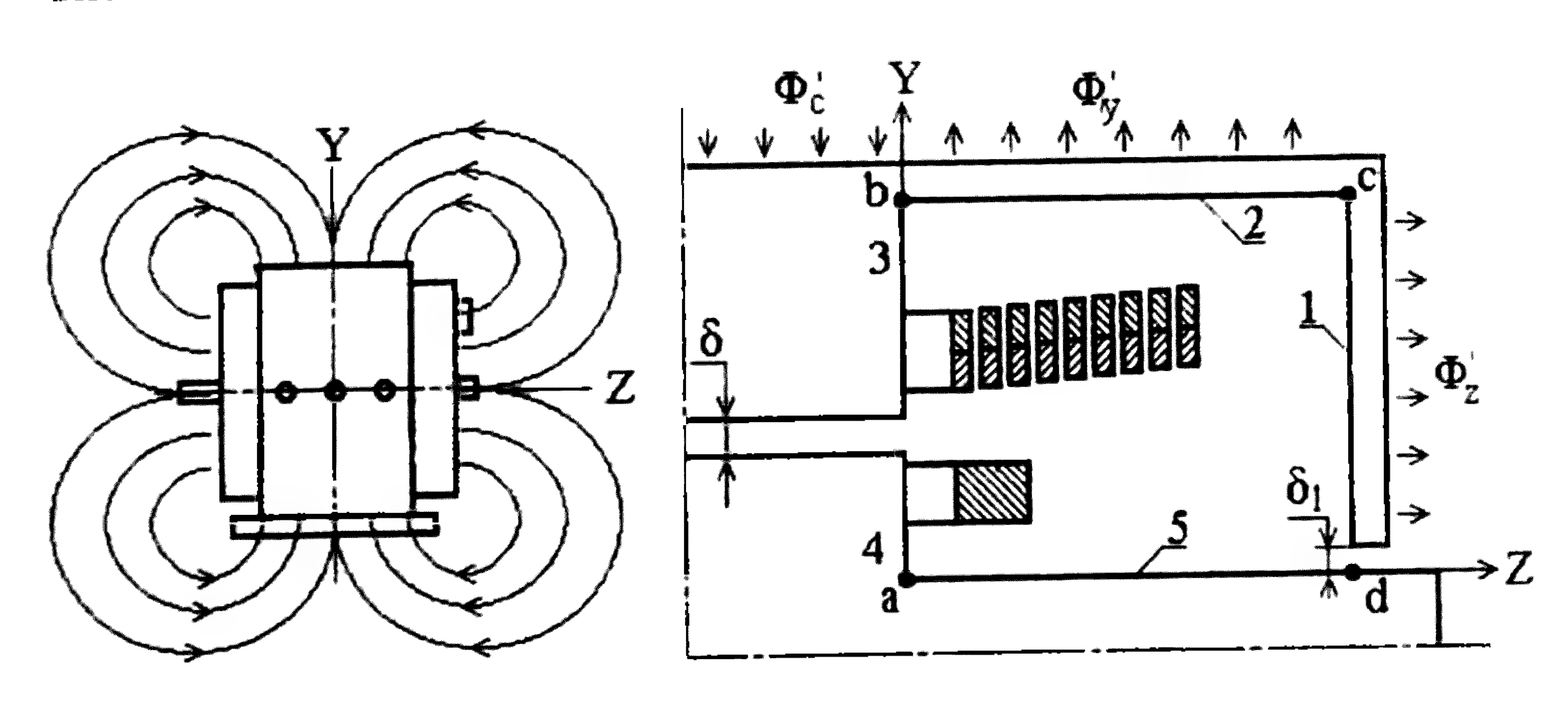


Рисунок 3.7 – Схема распределения внешних магнитных полей асинхронного двигателя

Из него видно, что если пренебречь незначительной продольной и поперечной несимметрией АД, то его легко построить, имея распределение одной четвертой внешнего магнитного поля АД. К тому же, при построении устройств диагностики повреждения ротора достаточно ограничиться моделированием магнитного поля только этой части внешних полей.

Моделирование внешних магнитных полей АД на внешней поверхности подшипникового или торцевого щита осуществляется по расчетной схеме на рисунке 3.7,б.

По этой схеме считается, что магнитные потоки $\Phi_z^{'}$ и $\Phi_y^{'}$ проникают из торцевой зоны наружу через подшипниковый щит 1 и корпус 2 АД, а магнитные потоки $\Phi_c^{'}$ - через сердечники статора 3, ротора 4 и вал ротора 5 в торцевую зону. При этом магнитный поток $\Phi_z^{'}$ находят следующим образом.

Первоначально определяется распределение магнитного поля по внутренним ферромагнитным поверхностям торцевой зоны. Затем рассчитывают магнитные потоки в ферромагнитных стенках торцевой зоны. Наконец, находят распределение магнитного поля на внешней поверхности подшипникового или торцевого щита.

Распределение магнитного поля по внутренним ферромагнитным поверхностям торцевой зоны определяется с учетом [84], рисунка 3.4 и с условием, что на пограничных поверхностях с координатами $y=0$, $y=H$ и $z=0$, $z=T$ тангенциальная составляющая магнитного поля от обмоток статора и ротора B_1^{τ} и B_2^{τ} равна нулю, если их магнитная проницаемость $\mu_c=\infty$. Поэтому, магнитные потоки через стенку определяют только по B_1^n и B_2^n - их нормальной составляющей. В соответствии с рисунком 3.7,б, а также (3.8) и (3.10) на стенках $b-c$ и $a-d$ это B_{y1} и B_{y2}, а на стенке $a-b$ и $c-d$ – B_{z1} и B_{z2}.

На рисунке 3.8,а приведены кривые (▬) и (—) распределения нормальной составляющей магнитной индукции B^n от токов в обмотках статора и ротора по пограничным поверхностям торцевой зоны АД 4АМ100L6У3, рассчитанные по (3.8) и (3.10) для режима номинальной нагрузки. При этом подшипниковый щит расположен на отрезке cd.

Распределение магнитных потоков вдоль пограничных поверхностей по известному распределению $B_1^n=f(l)$ и $B_2^n=f(l)$ моделируется по расчетной схеме на рисунке 3.7,б при следующих допущениях [91]:

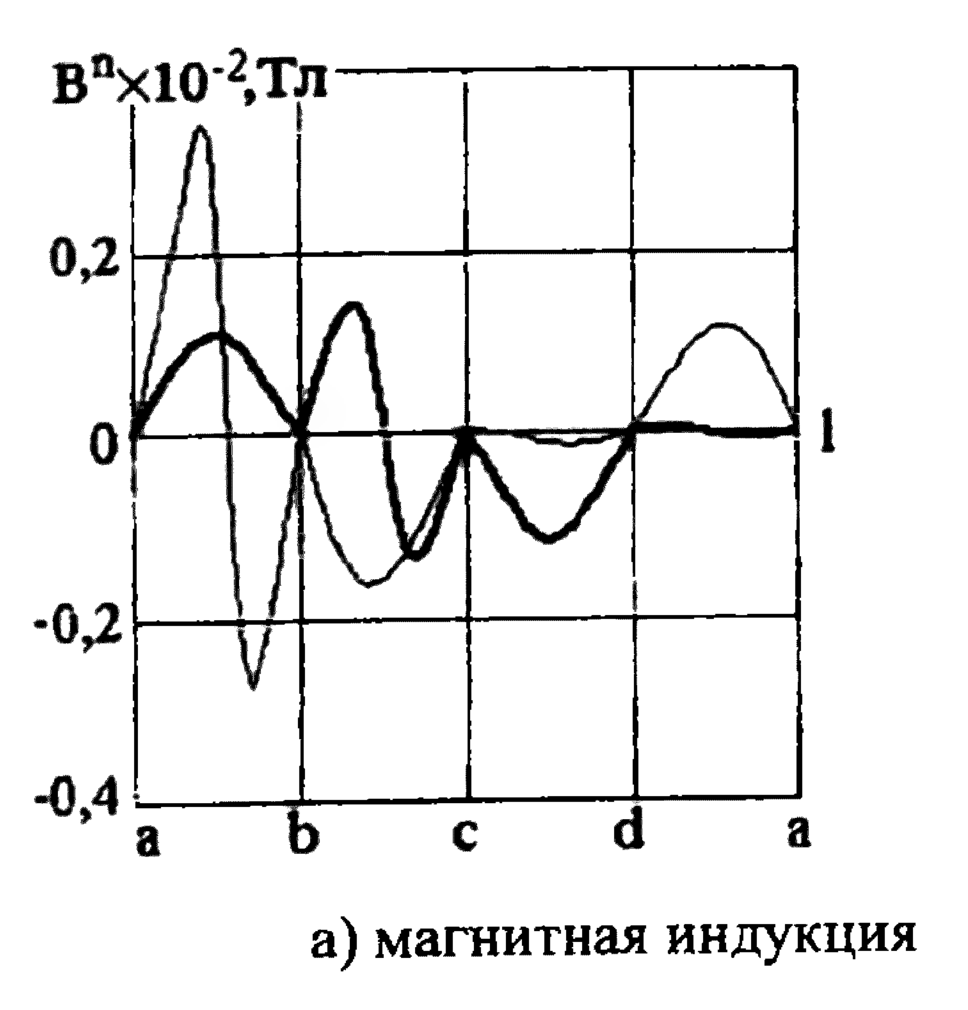
а) падением магнитного напряжения в ферромагнитных элементах, а также воздушными зазорами δ и δ_1 пренебрегается;

б) величина магнитного потока i - го элемента через j - й элемент (Φ_{ij}) по рисунку 3.9,а считается прямо пропорциональной Φ_i –

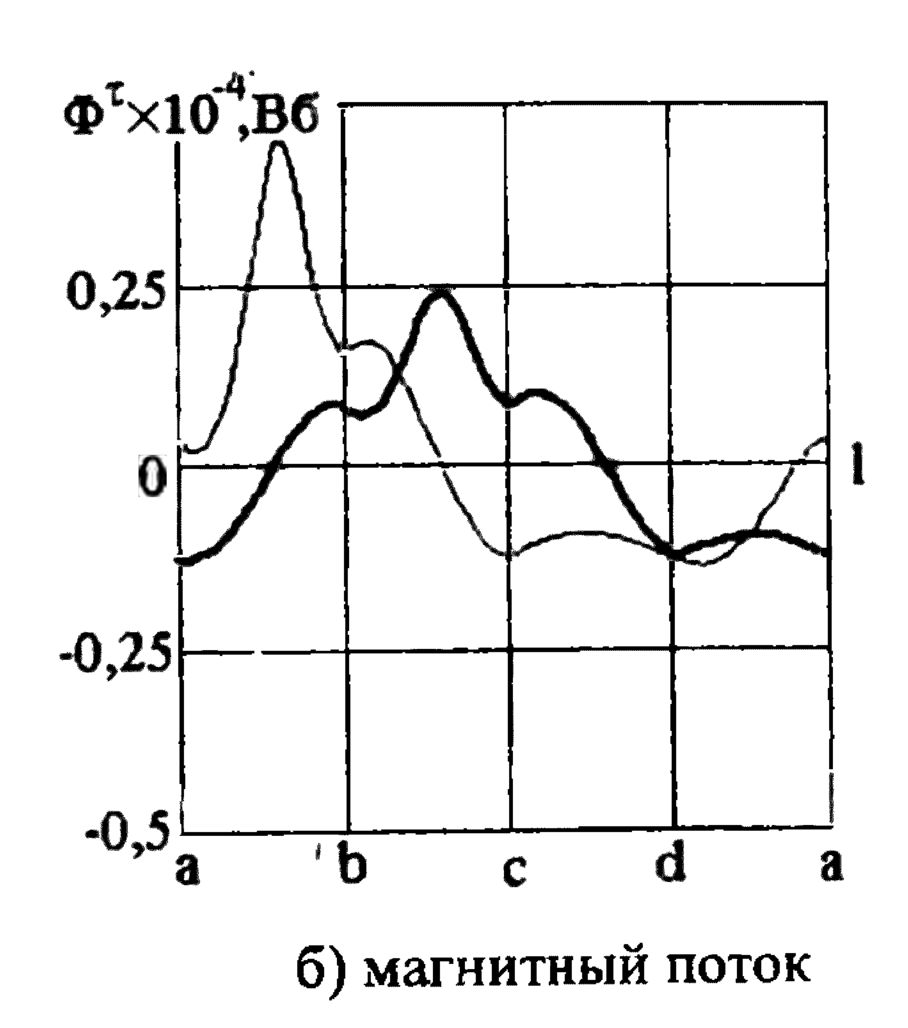
магнитному потоку i - го элемента и обратно пропорциональна R_{ij} воздушному промежутку между i -м и j -м элементами;

в) составляющие магнитного потока Φ_{ij} по контуру вдоль пограничных поверхностей и против часовой стрелки равны по величине. Положительным направлением при суммировании магнитных потоков в этом случае считается направление по часовой стрелке;

г) считается, что внешнее магнитное поле образуется только токами в лобовых частях обмоток статора и ротора АД.



а) магнитная индукция



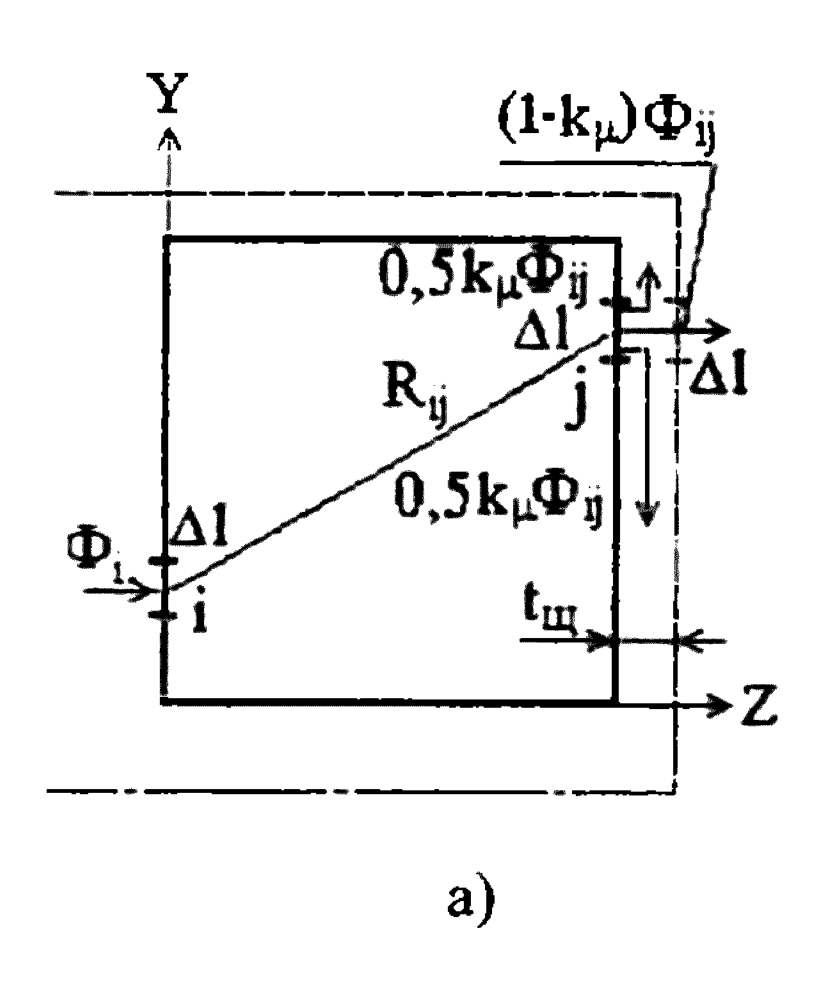
б) магнитный поток

Рисунок 3.8 – Распределение магнитной индукции от обмоток статора и ротора АД 4АМ100L6У3 по поверхности ферромагнитных стенок торцевой зоны и магнитных потоков по ферромагнитным стенкам

Моделирование магнитных потоков вдоль поверхности ферромагнитных элементов торцевой зоны осуществляется в следующем порядке. Первоначально в соответствии с рисунком 3.9 ферромагнитные поверхности вдоль обхода контура разбиваются на элементарные площадки с размерами $\Delta l \times b_{cn}$, где b_{cn} размер площадки вдоль оси x.

Затем определяются их координаты (y_i, z_i) и воздушный промежуток

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \qquad (3.11)$$



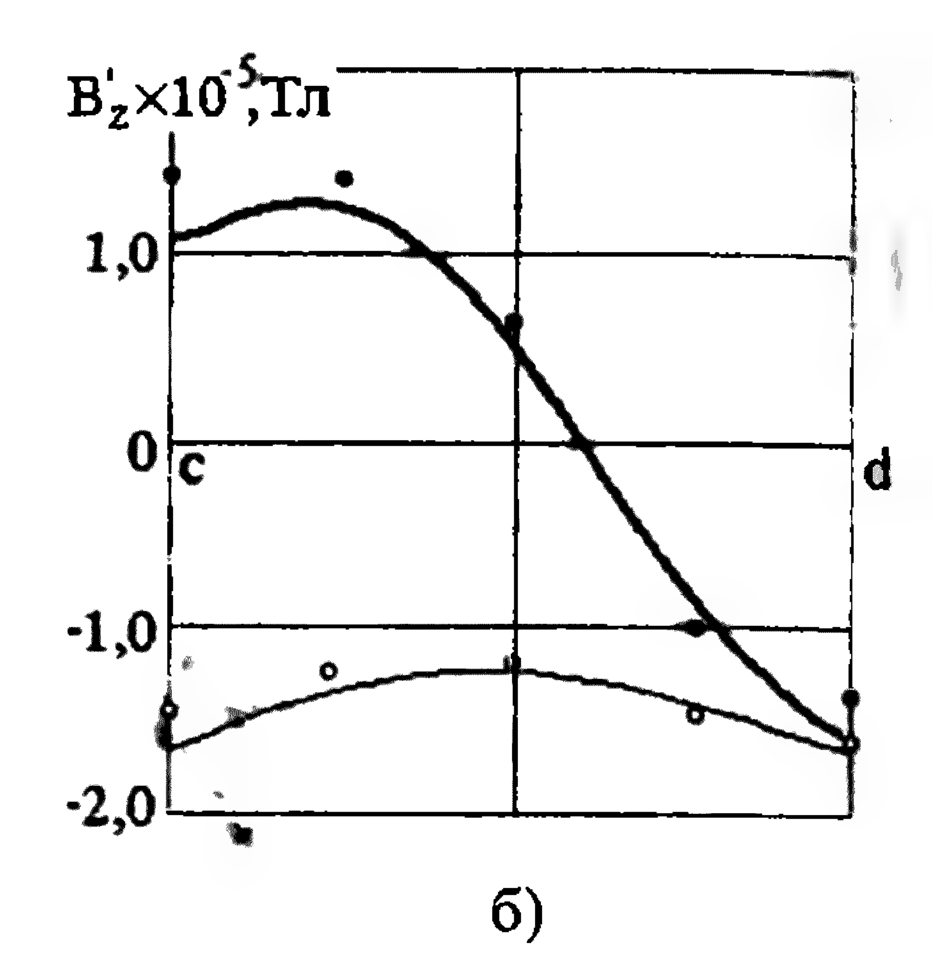


Рисунок 3.9 – Расчетная схема магнитных потоков вдоль поверхности ферромагнитных элементов торцевой зоны

Затем, находится расчетное расстояние между i-им и всеми j-ми элементами

$$R_{si} = 1 \Big/ \sum_j \frac{1}{R_{ij}} \tag{3.12}$$

и определяется часть магнитного потока Φ_i через j-й элемент

$$\Phi_{ij} = \Phi_i R_{si} / R_{ij}. \tag{3.13}$$

На рисунке 3.8,б кривыми (▬) и (—) показано рассчитанное распределение магнитных потоков от обмоток статора и ротора вдоль граничных поверхностей АД 4АМ100L6У3, где магнитный поток в торцевом щите проходит по отрезку $c-d$ на кривой.

Магнитный поток вдоль j-й элементарной площадки определяется как сумма потоков Φ_{ij} в ее границах. В соответствии с рисунком 3.9,а магнитный поток $\Phi_{ij} = B_{ij}\,\Delta l\, b_{cn}$ разветвляется. Часть его замыкается по ферромагнитной стенке, а часть выходит на внешнюю поверхность. Так как магнитная проницаемость подшипникового щита μ_c является конечной величиной, а величины потоков в его ферромагнитной стенке и на внешней поверхности можно считать пропорциональными их магнитной проницаемости, то

приняв $k_{\mu} = 1/\mu_c$, приближенно получим индукцию магнитного поля на поверхности щита

$$B_{\text{щ}} = \Phi_{\text{щ}} k_{\mu} / (\Delta l b_{\text{сп}}).\qquad (3.14)$$

В реальных условиях [84] магнитная проницаемость ферромагнитных стенок в электрических машинах имеет конечную величину и колеблется в пределах 40–1400. Если для подшипникового шита принять μ_c=40, то индукция магнитного поля от обмоток статора и ротора на его поверхности распределится как показано на рисунке 3.9,б, где кривые (━) и (—) получены расчетным, а (●) и (○) экспериментальным путем. Из рисунка видно, погрешность расчета не превысила 20-25 %.

3.3 Моделирование магнитных полей АД с алюминиевым корпусом

Корпус 4 и подшипниковый щит 5 АД на рисунке 3.1 иногда выполняют из алюминиевых сплавов. В результате, моделирование магнитных полей статора и ротора АД в его торцевой зоне и снаружи сводится к построению распределения магнитного поля проводников в прямоугольном ферромагнитном угле.

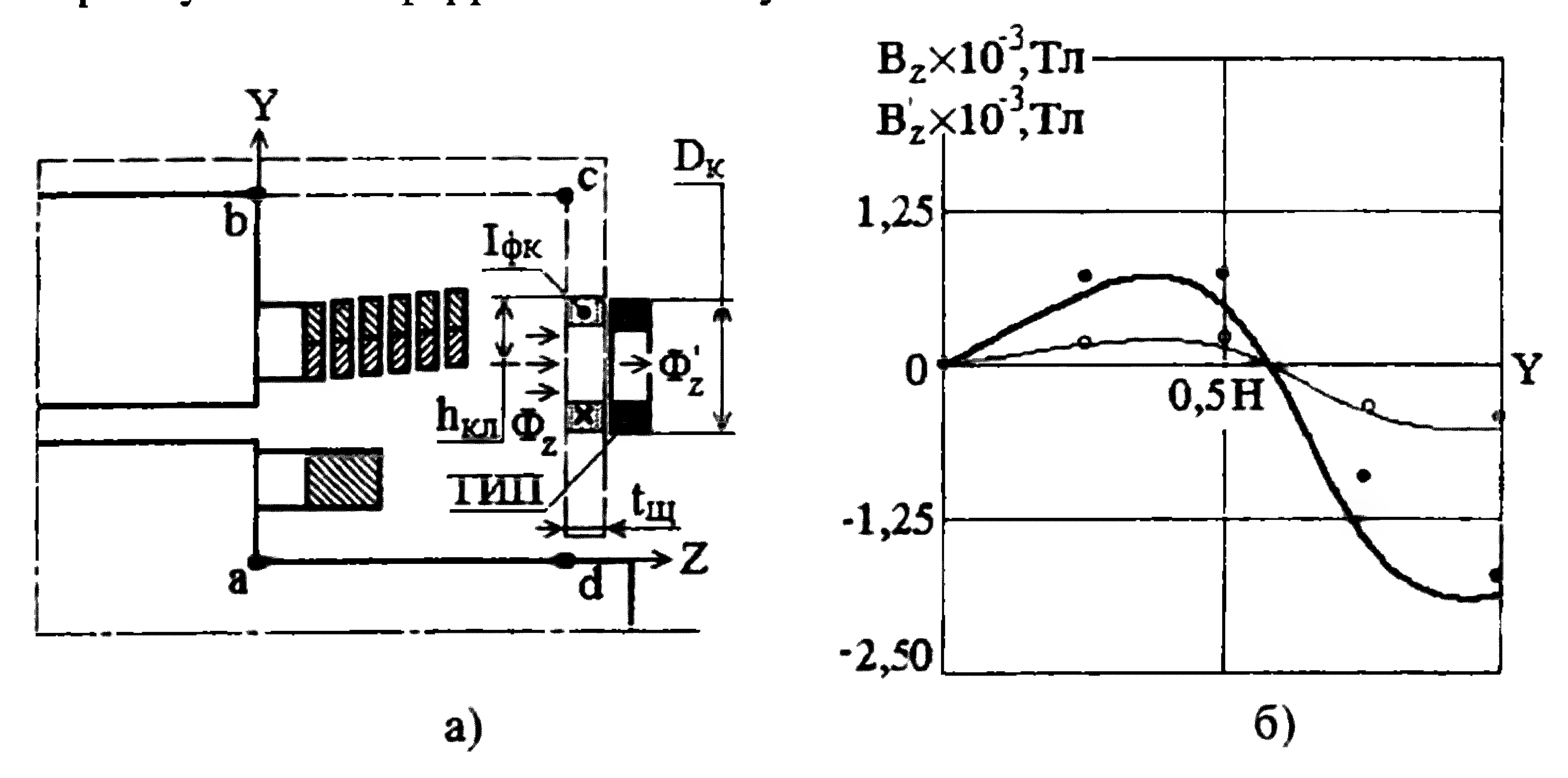


Рисунок 3.10 – Распределение внешних магнитных полей АД с алюминиевым корпусом

В этом случае магнитные поля статора и ротора АД моделируют от тангенциальной составляющей тока в них, а влияние

ферромагнитных стенок в методе зеркальных отражений заменяется магнитными полями только трех отраженных токов [88, 92]. Для этого применяют уравнения (3.1)-(3.10), в которых используют только отраженные токи с i=1 и j=1, а коэффициенты коррекции K_y и K_z приняты равными единице.

В итоге, моделирование магнитных полей статора и ротора на внутренней поверхности подшипникового или торцевого щита должно осуществляется по расчетной схеме на рисунке 3.10,а. Результаты эксперимента и расчета распределения индукции магнитных потоков обмотки статора вдоль внутренней поверхности подшипникового щита на рисунке 3.10,б показаны линией (—) и символом (●).

Магнитные потоки Φ_z' на внешней стенке от токов в обмотках статора и ротора меньше. Это вызвано тем, что алюминиевая стенка подшипникового щита обладает экранирующим действием. Эффективность экрана определена толщиной $t_щ$, удельной проводимостью $\rho_щ$ материала стенки и частотой f_v магнитного поля. Точная математическая модель такого экрана для ТИП с катушкой круглой или прямоугольной формы сложна и различна. При ориентировочной оценке эффекта экранирования таких катушек считается, что параметры прямоугольной катушки размерами вдоль осей X и Y равными a_x и a_y и круглой катушки с диаметром $D_к$ одинаковы. При этом диаметр, средний диаметр и площадь круглой катушки определяется как

$$D_к = \sqrt{4a_x a_y / \pi}\,,\quad D_{ср} = D_к/2 \text{ и } s_к = \pi D_{ср}/4.$$

Так как экранирование гармонических магнитных полей с различной частотой различно, а процесс моделирования осуществляется в пределах от 0 до f_1 и одинаков для всех частот, поэтому он рассматривается только для основной гармонической сети.

Экранирование катушки ТИП проводящей стенкой подшипникового щита толщиной $t_щ$ осуществляется за счет возникновения в этой стенке токов Фуко $I_{фк}$. Эти токи, индуцированные магнитным потоком $\Phi_z = B_z \pi D_к^2/4$ от токов в обмотках статора и ротора, создают встречный магнитный поток $\Phi_{фк}$. Сумма магнитных потоков Φ_z и $\Phi_{фк}$ будет определять магнитный

поток Φ_z' на внешней поверхности подшипникового щита. Отношение магнитных потоков внутренней стенки щита к внешней определяет коэффициент экранирования магнитного потока

$$k_\partial = \frac{\dot{\Phi}_z}{\dot{\Phi}_z'} = \frac{\dot{\Phi}_z}{\dot{\Phi}_z - \dot{\Phi}_{фк}}. \qquad (3.15)$$

Предположим, что магнитный поток $\Phi_{фк}$ должен создаваться контуром подшипникового щита, совпадающим по размерам с контуром катушки ТИП. На рисунке 3.10,а этот контур в стенке подшипникового щита заштрихован. Тогда ток $I_{фк}$ в этом контуре предлагается рассчитывать как

$$I_{фк} = E_{фк} / Z_{фк}, \qquad (3.16)$$

где $E_{фк}$ – ЭДС демпфирующего контура;

$Z_{фк}$ – полное сопротивление этого контура.

Если ТИП круглый, то ЭДС контура, в соответствии с (2.1) определяется как

$$E_{фк} = 2\pi f_1 B_z s_к. \qquad (3.17)$$

Активное, реактивное по [94] и полное сопротивление контура определяется как

$$R_{фк} = \rho_щ \frac{\pi D_{ср}}{t_щ h_{кл}}, \; X_{фк} = \pi f_1 \mu_0 D_к (\ln \frac{4D_к}{t_щ + h_к} - 0{,}5) \text{ и}$$

$$Z_{фк} = R_{фк} + jX_{фк} \qquad (3.18)$$

где $\rho_щ$ – удельное сопротивление литого алюминия, которое по [95] составляет 0,021 Ом·м/мм^2;

$h_{кл}$ – высота кольца

$$h_{кл} = D_{ср} / 2.$$

Магнитный поток $\Phi_{фк}$ от токов $I_{фк}$ через плоскость катушки с учетом [88] можно определить как

$$\Phi_{фк} = B_{фк} s_к = \mu_0 \frac{I_{фк}}{D_к} s_к. \quad (3.19)$$

В результате, магнитный поток через плоскость катушки на внешней поверхности подшипникового щита

$$\dot{\Phi}_z' = \dot{\Phi}_z - \dot{\Phi}_{фк}. \quad (3.20)$$

определяет коэффициент экранирования магнитного потока

$$k_д = \frac{B_z s_к}{B_z s_к - \mu_0 \dfrac{I_{фк}}{D_{ср}} s_к} = \frac{B_z}{B_z - \mu_0 \dfrac{I_{фк}}{D_к}}.$$

Из уравнения ясно, что для любой точки на поверхности подшипникового щита коэффициент экранирования будет свой и определен индукцией магнитного поля именно в этой точке. Поэтому, индукция магнитного поля на внешней поверхности подшипникового щита рассчитывается как

$$B_z' = B_z / k_д. \quad (3.21)$$

Результаты эксперимента и расчета распределения индукции магнитных потоков обмотки статора на внешней поверхности подшипникового щита на рисунке 3.10,б показаны линией (–) и символом (○). Аналогичные зависимости величины для индукции магнитного поля обмотки ротора приведены на рисунке 3.11.

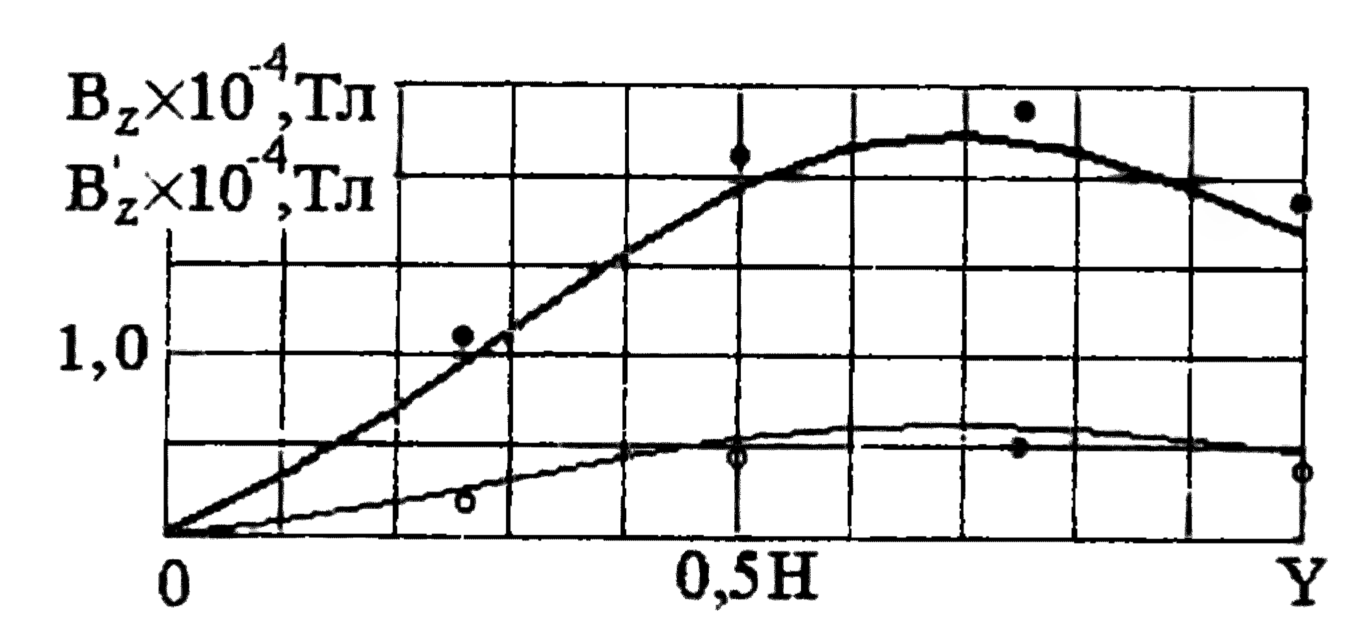


Рисунок 3.11 – Распределение внешних магнитных полей обмотки ротора АД с алюминиевым корпусом

Из рисунков 3.10 и 3.11 видно, погрешность расчета не превышает 20–25 %. Это указывает на то, что предложенный способ ориентировочной оценки величины внешнего магнитного поля позволяет моделировать эти магнитные поля просто и с приемлемой точностью.

3.4 Конструктивные особенности измерительных щупов

Анализ способов и блок - схем устройств диагностики повреждения «беличьей клетки» ротора на рисунках 2.13 и 2.18 показывает, что разрабатываемые системы диагностики конструктивно следует выполнять в виде двух блоков. Это электрически связанные между собой блок измерения и блок контроля. В первый из них входят непосредственно ТИП, их коммутация и элементы регулирования выходного напряжения и защиты входа второго блока. Он выполняется в виде измерительного щупа. Второй блок представлен ПК типа «Notebook», к звуковому входу которого подключают этот измерительный щуп. Процесс измерения показан на рисунке 3.12, где 1 – диагностируемый АД, 2 – торцевой (подшипниковый) щит, 3 – измерительный щуп, 4 – персонального компьютера типа Notebook, 5 – выносные разъемы ТИП измерительного щупа, 6 – клеммник выводов ТИП системы диагностики обмотки ротора.

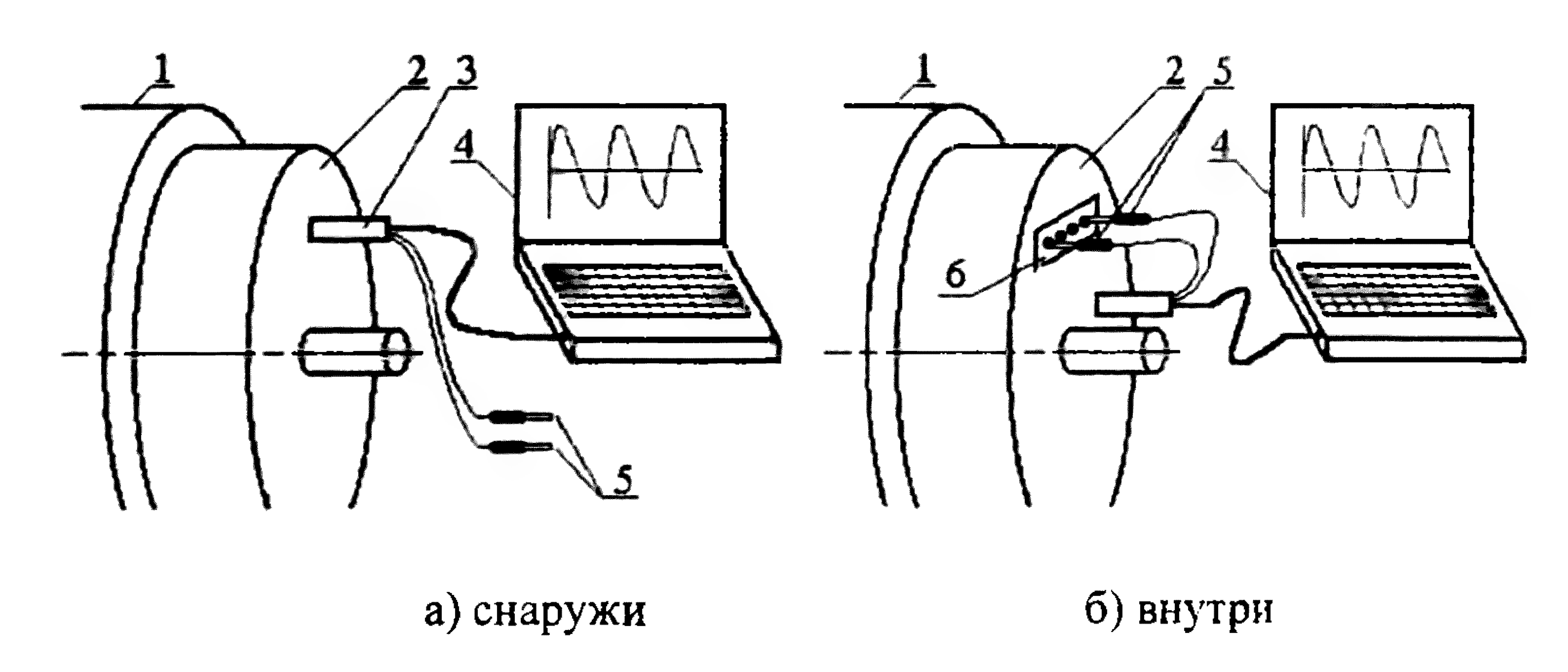
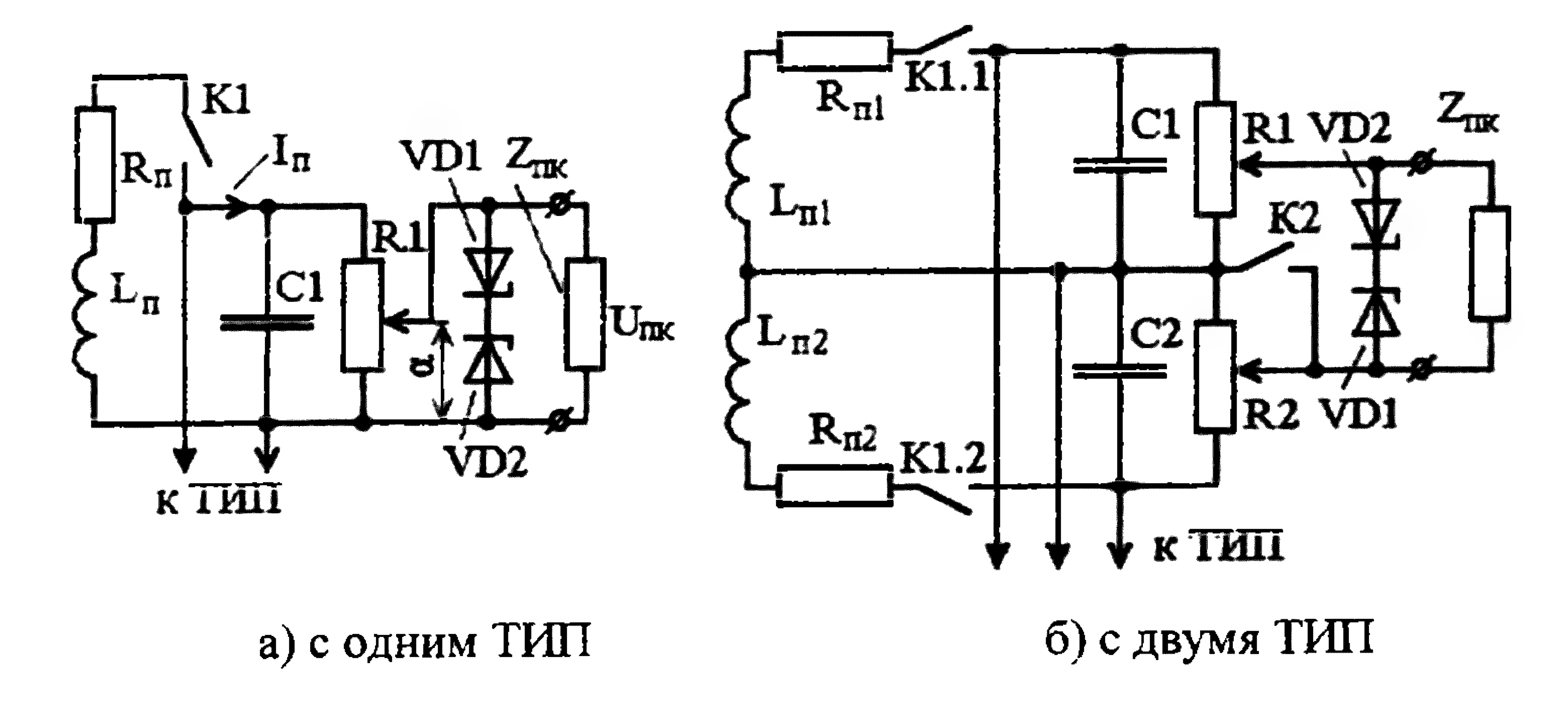


Рисунок 3.12 – Схема диагностирования АД без герконового датчика скольжения с одним ТИП снаружи – (а) и внутри АД – (б)

В соответствии с разработанными способами диагностики для измерения магнитного поля поврежденного стержня с $p=1$ может использоваться один или два ТИП. Эти ТИП могут размещаться на

внутренней или внешней поверхности подшипникового щита. В первом случае это ТИП, которые используются в АД для защиты обмотки статора [26-29]. Во втором случае – это ТИП, которые являются составной частью измерительного щупа. Поэтому конструкция измерительного щупа в том и другом случае будет различна.

ЭДС на выходе измерительного щупа определена параметрами магнитного поля в области размещения ТИП. Величина этого поля зависит от типа и мощности АД, а также от точки размещения ТИП. Как показали эксперименты на АД 4АЗМ-6000-8000, при размещении ТИП в виде катушки от промежуточного реле типа РП-25 на внутренней поверхности торцевого щита в режиме нагрузки ЭДС составляет порядка 48 В. В то же время ЭДС такой катушки на внешней поверхности подшипникового щита АД 4АМ100L6У3 в режиме нагрузки не превышает 0,01-0,1 В. Однако, по [93] напряжение на входе звуковой карты ПК типа Notebook не должно превышать 0,5-0,8 В. Поэтому в измерительном щупе требуется защита входа ПК в виде ограничителя напряжения, а также устройство для регулировки величины выходного напряжения. Кроме того, при конструировании желательно учитывать возможность «наводки» в соединительном кабеле внешним магнитным полем.



а) с одним ТИП б) с двумя ТИП

Рисунок 3.13 – Схема измерительного щупа с одним

Схемы измерительного щупа с одним ТИП приведены на рисунке 3.13,а, где L_n и R_n – индуктивность и активное сопротивление встроенного в щуп ТИП; $K1$ – выключатель для отключения встроенного ТИП; $C1$ – емкость для сглаживания высокочастотной

составляющей сигнала; $R1$ – регулятор уровня напряжения на выходе щупа; $VD1$ и $VD2$ – стабилитроны типа КС119А для ограничения перенапряжения на выходе щупа. На рисунке 3.13,б приведена схема измерительного щупа с двумя ТИП, где перечисленные и аналогичные им элементы выполняют те же функции, а $K2$ предназначен для подачи на вход ПК ЭДС одного и двух ТИП.

Конструкция измерительного щупа определена числом ТИП. Если ТИП один, то одним из вариантов конструкции щупа может быть такой, который приведен на рисунке 3.14, где: 1 – корпус щупа; 2 – резиновая юбка для предотвращения радиальных перемещений при измерении; 3 – выключатель $K1$; 4 – резистор регулирования уровня напряжения на выходе щупа; 5 – кабель к входу ПК; 6 – выводы для подключения к ТИП защиты АД от витковых замыканий.

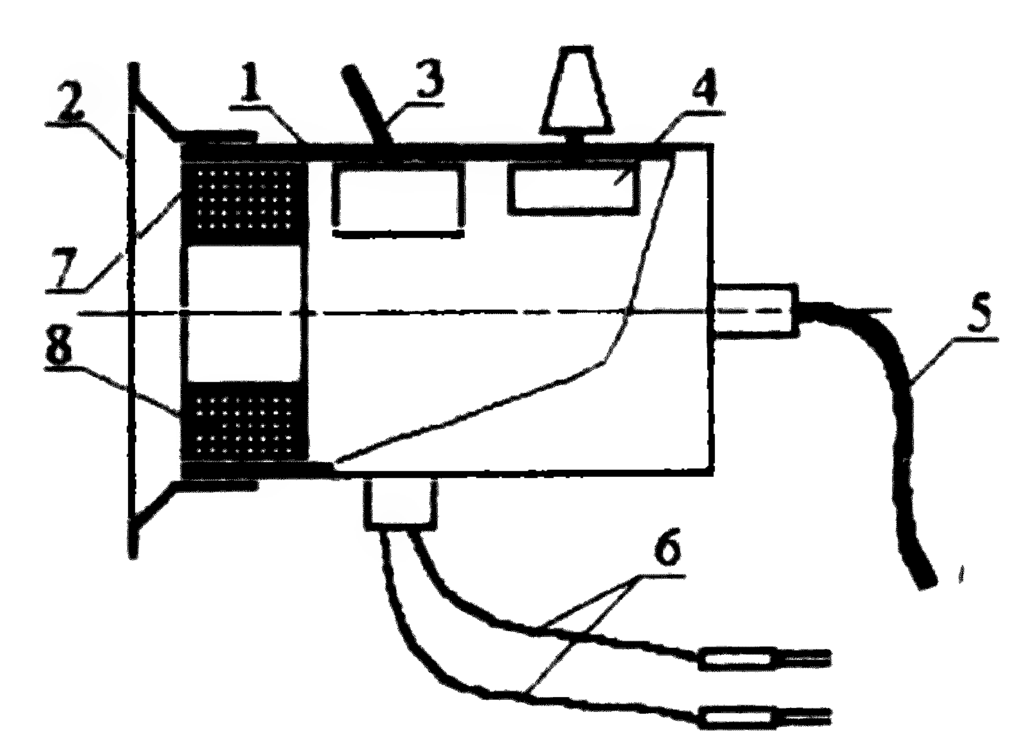


Рисунок 3.14 – Конструкция измерительного щупа с одним ТИП

Измерение таким щупом осуществляется в следующей последовательности. Кабель 5 отсоединяют от входа ПК и подключают к вольтметру с большим входным сопротивлением. Если измерение осуществляется от ТИП защиты, то к нему подключают выводы 6, а выключатель $K1$ размыкают. В выбранном режиме диагностики резистором 4 выставляют максимально возможное напряжение, которое, однако, не должно превышать 0,5 В. Затем вольтметр отсоединяют, а разъем кабеля вставляют в гнездо ПК и осуществляют диагностику.

Если измерение осуществляется от ТИП щупа, то выключатель $K1$ замыкают. В процессе измерения щуп с некоторым усилием прижимается юбкой 2 к поверхности подшипникового щита. При этом юбка деформируется и осуществляет надежное сцепление с поверхностью подшипникового щита. Остальные операции измерения осуществляют также как в предыдущем случае.

Если ТИП два, то измерительный щуп может быть выполнен в виде, показанном на рисунке 3.15, где: 1 – поверхность подшипникового щита; 2 – вал ротора с центровочным отверстием; 3 – ТИП; 4 – кронштейн крепления ТИП; 5 и 6 – болты и винты крепления кронштейна 4; 7 – рама измерительного щупа; 8 – держатель измерительного щупа; 9 – подшипники; 10 – наконечник; 11 – пружина; 12 – рукоять держателя, соединяется с держателем с помощью резьбы; 13 – резиновые юбки.

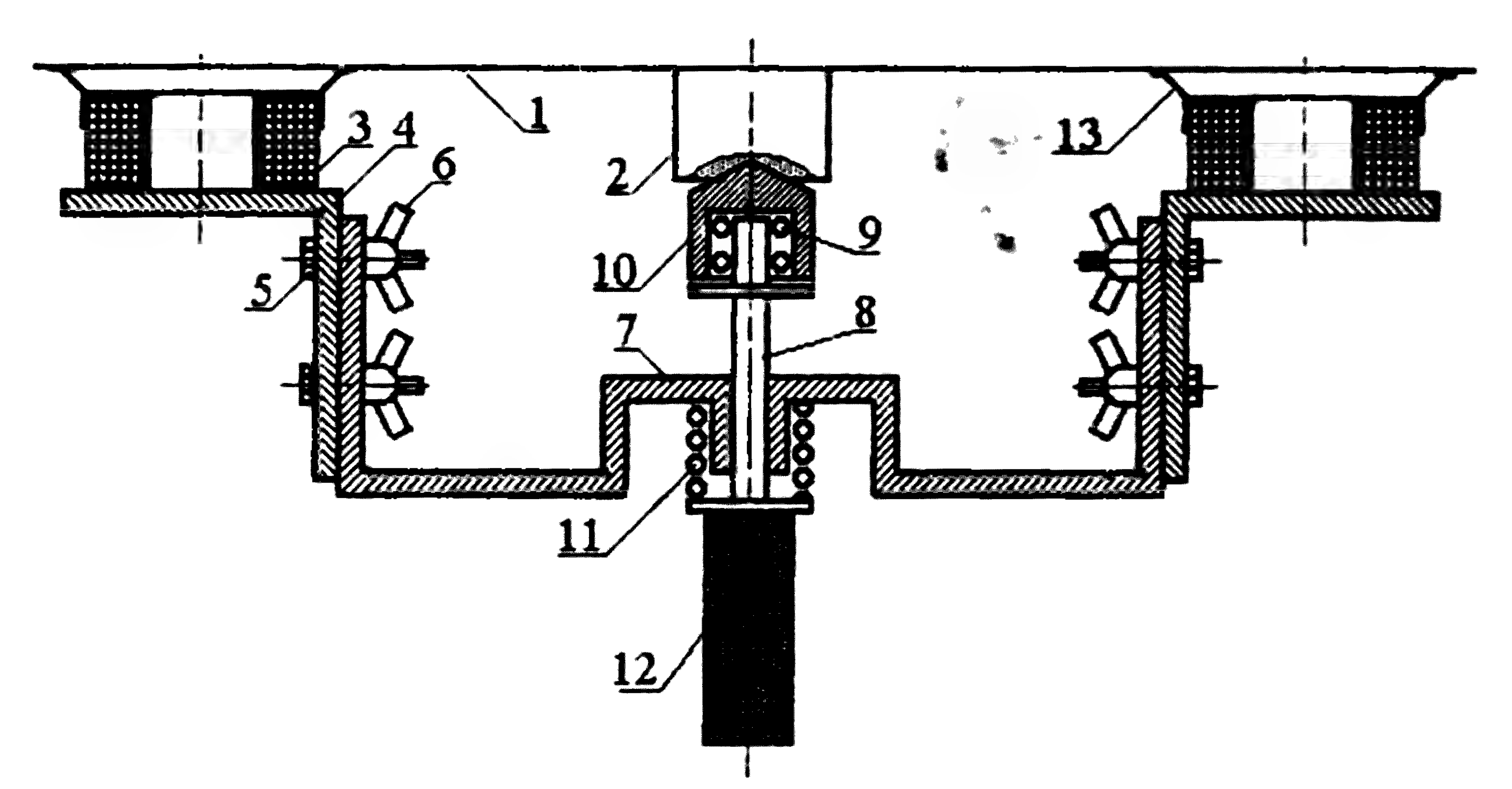


Рисунок 3.15 – Конструкция измерительного щупа с двумя ТИП

Из рисунка 3.15 видно, что ТИП 3 закреплены на кронштейнах 4, а кронштейны с помощью регулировочных болтов 5 и винтов 6 к раме 7. Это позволяет изменять расстояние между рамой 7 и ТИП 3 в зависимости от длины выступающего конца вала 2. При измерении измерительный щуп удерживается за рукоять 12 держателя 8 рукой. Для осуществления измерения щуп подносят к подшипниковому щиту 1 так, чтобы наконечник 10 держателя 8 был направлен в центровочное отверстие. При этом, поверхности подшипникового щита вначале касаются ТИП. Затем, при перемещении держателя в осевом направлении, они прижимаются к нему пружиной 11, а наконечник 10 входит в центровочное отверстие вала ротора. За счет этого осуществляется достаточно точная ориентировка ТИП в пространстве относительно АД.

Измерение щупом с двумя ТИП осуществляется в следующей последовательности. Отсоединяют кабель от входа ПК и подключают к вольтметру с большим входным сопротивлением. Выключателями $K1.1$ и $K1.2$ осуществляют коммутацию ТИП, а $K2$ – замыкают один из ТИП. В выбранном режиме диагностики резистором $R1$

выставляют максимально возможное напряжение, а после выключения $K2$ резистором $R2$ балансируют щуп по минимуму напряжения на выходе. При этом это напряжение не должно превышать 0,5 В. Затем вольтметр отсоединяют, а разъем кабеля вставляют в гнездо ПК и осуществляют диагностику.

ТИП для щупа конструктивно прост. В соответствии с рисунком 3.13 его основой является каркас 7 из термореактивной пластмассы с двумя металлическими клеммами. В его паз наматывается катушка 8 из изолированного провода.

Выводы катушки припаяны к клеммам. К ним же паяют коммутационные проводники. Как показал опыт эксплуатации, для катушки следует выбирать медный провод с диаметром не менее d_{np}=0,12–0,15 мм с термостойкой изоляцией типа ПЭВ-2 и ПЭТВ. На практике обычно используют серийно выпускаемые катушки. Хорошо для ТИП щупов подходят катушки от промежуточных реле, обычно используемые в релейной защите. Параметры некоторых из них приведены в [32].

3.5 Моделирование напряжения на выходе измерительного щупа

Моделирование напряжения на выходе измерительного щупа устройства диагностики повреждения «беличьей клетки» ротора АД сводится к расчету параметров ТИП и элементов схемы измерительных щупов.

Под параметрами ТИП принимают комплексное сопротивление катушки $Z_n = R_n + jX_n$ и индуцированную в ней ЭДС E_n, где R_n и X_n - активное и индуктивное сопротивление ТИП. Активное сопротивление ТИП из катушки от промежуточного реле можно получить из [32]. Если при конструировании измерительного щупа не удовлетворяют размеры или параметры этих катушек, то ТИП изготавливают кустарным способом. В этом случае

$$R_n = \rho_t \frac{l_{cp} w_n}{s_{np}}, \qquad (3.22)$$

где ρ_t – удельное сопротивление меди, которое по [95] составляет 0,017 Ом·м/мм^2;

l_{cp} – средняя длина витка провода катушки ТИП;

s_{np} – площадь поперечного сечения провода.

Индуктивное сопротивление круглого ТИП с учетом близости ферромагнитной стенки подшипникового щита рассчитывается по [94] как

$$X_n = X_n' + \Delta X_n; \; X_n' = 11\mu_0 f w_n^2 D_{cp};$$

$$\Delta X = (1{,}9 \div 4{,}0)\frac{\mu_0 f w_n^2}{2} D_{cp}, \qquad (3.23)$$

где X_n' и ΔX – индуктивное сопротивление ТИП и его увеличение за счет влияния ферромагнитной поверхности торцевого щита.

Величины R_n и X_n катушек некоторых реле приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры ТИП из катушек от промежуточных реле

Тип реле	Число витков, w_n	Марка и диаметр провода, мм	Расчетные величины	
			R_n,Ом	X_n,Ом
РП-25	3000	ПЭВ-2 Ø0,21	170,8	180,4
РП-25	3850	ПЭВ-2 Ø0,18	298,4	297,1
РП-25	6700	ПЭВ-2 Ø0,14	858,3	899,8
РП-213	8300	ПЭВ-2 Ø0,125	1333,8	1380,8
РП-211	4500	ПЭВ-2 Ø0,17	391,0	405,9
РП-211	9000	ПЭВ-2 Ø0,12	1569,3	1623,5

Амплитудное значение ЭДС на выходе ТИП, размещаемого внутри машины, определяется с учетом уравнений (2.1) – (2.5) как

$$E_n = E_{n1} + E_{n2} + E_{n2э} + E_{n2д}. \qquad (3.24)$$

Если ТИП встроен в щуп, то его ЭДС определяется аналогично

$$E_n' = E_{n1}' + E_{n2}' + E_{n2э}' + E_{n2д}'. \qquad (3.25)$$

В соответствии с рисунком 3.12,а когда у переменного резистора задан α, то ТИП нагружен на входное сопротивление элементов щупа

$$Z_{вх} = Z_п + \frac{Z_{экв}(-jX_{c1})}{Z_{экв} - jX_{c1})}, \text{ где } Z_{экв} = (1-\alpha R_1) + \frac{\alpha R_1 Z_{пк}}{\alpha R_1 + Z_{пк}}. \quad (3.26)$$

У ПК входное сопротивление звуковой карты достаточно велико. Если его принять равным бесконечности, а напряжение на выходе щупа $U_{пк}$ меньше прямого напряжения диодов, то при произвольном α

$$Z_{вх} = Z_п - \frac{R_1\ jX_{c1}}{R_1 - jX_{c1}},$$

а ток в катушке ТИП, напряжение на ее выводах и на выходе щупа соответственно будут равны

$$I_п = \frac{E_п}{Z_{вх}},\ U_п = E_п - I_п Z_п \text{ и } U_{пк} = \frac{U_п \alpha R_1}{R_1} = (E_п - I_п Z_п)\alpha. \quad (3.27)$$

В экспериментальных исследованиях использовалась катушка РП-25 с $w_п$=6700 вит, емкость $C1$ принималась равной 1,7 мкф, а сопротивление резистора $R1$=4,7 кОм. Для ограничения напряжения на выходе щупа использовались стабилитроны типа КС119А.

Оценка эффективности емкости C1 производилась по осциллограммам напряжения на выходе щупа. Так осциллограмма этого напряжения без емкости и с ней приведена на рисунке 3.16.

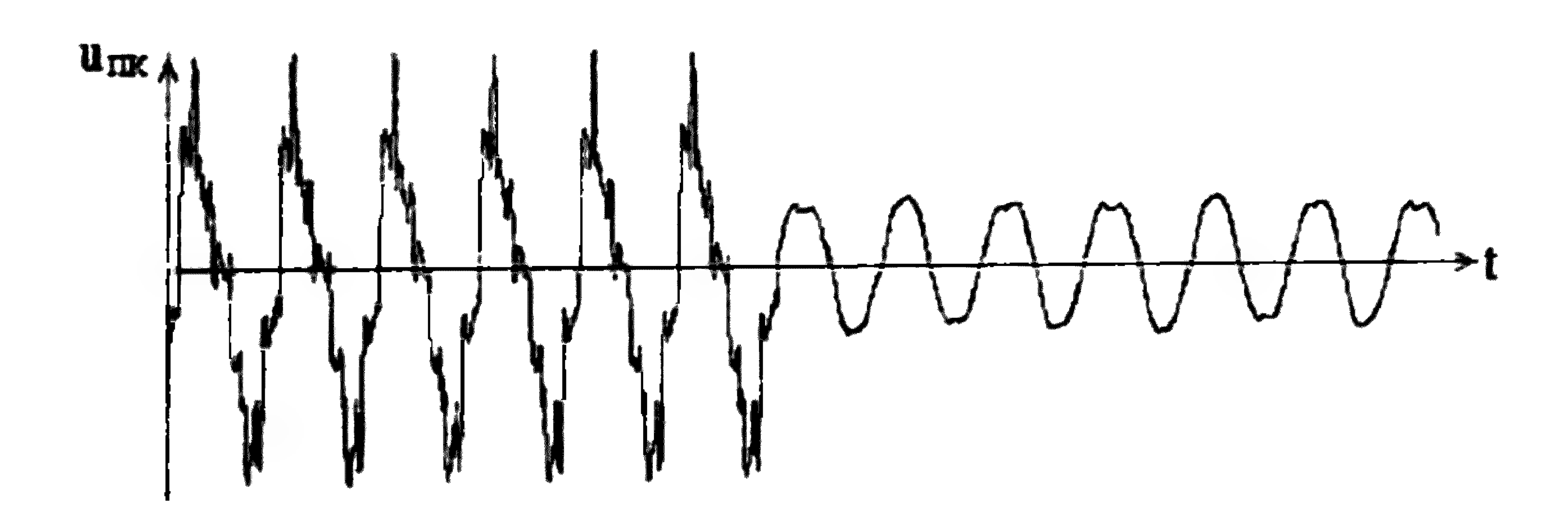


Рисунок 3.16 – Осциллограммы напряжения на выходе щупа с одним ТИП без емкости и с емкостью

Из осциллограмм видно, что гармонические с частотами выше 50 Гц, которые оказывают значительное влияние на точность работы

АЦП звуковой карты ПК и определение длительности периода основной гармонической сети, при включении конденсатора резко уменьшаются. Это, несомненно, повышает чувствительность системы диагностики.

3.6 Оценка влияния факторов определяющих чувствительность устройства диагностики к повреждению короткозамкнутого ротора

Погрешность измерения устройства диагностики повреждения «беличьей клетки» ротора АД в основном определенна погрешностью измерения параметров основной гармонической сети с частотой f_1 и гармонических ЭДС с частотами $f_{n2d} = f_1/p[(1-s) \mp ps]$, которые определяют путем разложения напряжения $U_{пк}$ на выходе измерительного щупа в ряд Фурье. В свою очередь погрешность разложения в ряд Фурье $U_{пк}$ зависит от колебаний частоты сети, тока АД нагрузки во время диагностирования, а также от длительности измерения сигнала при диагностировании. Оценим влияние этих факторов.

Погрешность измерения устройства диагностики, вызванная колебаниями частоты сети, определена неточностью в определении периода, а следовательно времени диагностирования. Номинальное значение частоты токов и напряжений основной гармонической сети $f_{1,ном}$ равно 50 Гц, а длительность ее периода $T_{1,ном} = 1/f_{1,ном}$ =0,02 с. Но, в соответствии с ГОСТ 13109-97 [96] допускается их отклонение. Нормально допустимые значения основной гармонической f_1 сети достигают 49,8÷50,2 Гц, а предельно допустимые – 49,6–50,4 Гц.

Для повышения точности выделения необходимых составляющих из напряжения $U_{пк}$ на выходе измерительного щупа необходимо повышать точность в определении периода гармонического сигнала.

Спектральный анализ напряжения $U_{пк}$ осуществляется путем дискретного преобразования Фурье [97, 88]. Поскольку частота f_1 и ее период $T_1 = 1/f_1$ в сети не постоянны, то, прежде всего, требуется определять их текущее значение на момент разложения. Для этого можно использовать методы «постоянного периода» или «нулевых точек». Оценим погрешность дискретного представления сигнала в ПК при использовании этих методов.

При использовании метода «постоянного периода» период $T_{разл}$

разложения в ряд Фурье принимается постоянным и равным $T_{1,ном}$. В этом случае предельно допустимое отклонение основной гармонической в сигнале составляет $\Delta f_1 = \pm 0{,}4$ Гц, а ее период определится как

$$T_1 = 1/(f_{1\,ном} \pm \Delta f_1),$$

при этом предельно допустимую относительную погрешность измерения периода в процентах можно определить как

$$\varepsilon_T = \frac{T_{1,ном} - T_1}{T_{1,ном}} = \frac{\Delta T_1}{T_{1,ном}} 100\% = \frac{0{,}00016}{0{,}02} 100\% = 0{,}8\%. \qquad (3.28)$$

Такая погрешность измерения периода при разложении $U_{пк}$ только с частотой 50 Гц в ряд Фурье дает спектр, который приведен на рисунке 3.17, где штрих-пунктирной и сплошной линиями показаны результаты разложения с периодом $T_{разл}$ равным 0,02 с и 0,01984 с соответственно.

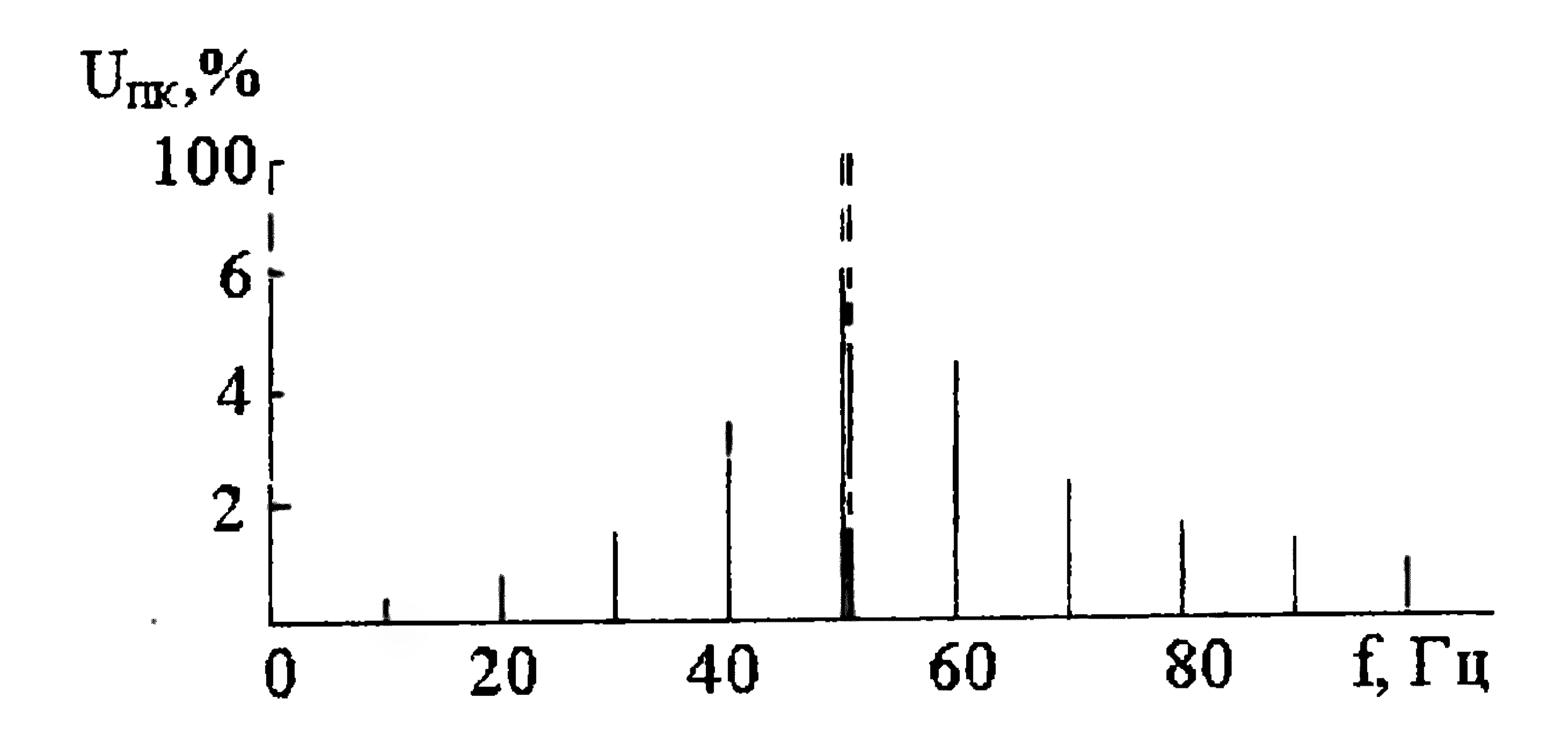


Рисунок 3.17 – Спектр электрического сигнала при разложении в ряд Фурье с периодом $T = 0{,}02 с$ и $T = 0{,}01984 с$.

Из рисунка видно, что неточность в определении периода приводит к появлению новых гармонических, а относительная погрешность расчета дополнительных гармонических с частотами $f_{m2д}$ в этом случае при фиксированном скольжении составит

$$\varepsilon_{m2\partial} = \frac{U_{m2p}}{U_{m2\partial} + U_{m2p}} 100\%, \qquad (3.29)$$

где $U_{m2\partial}$ и U_{m2p} – напряжение гармонической $f_{m2\partial}$ в контролируемом сигнале и величина напряжения гармонической с частотой $f_{m2\partial}$ при разложении в ряд Фурье.

Так по данным рисунка 2.7,б, при скольжении ротора $s = 0{,}07143$ АД АОЛ2-11-4 в напряжении $U_{пк}$ на выходе измерительного щупа напряжение $U_{1п}$ гармоники частотой f_1 равно 1343 мВ, а гармонической $U_{m2\partial}$ с частотой $f_{п2\partial} = \frac{f_1}{p}[(1-s) - sp]$=19,68 Гц составило 31 мВ. При разложении в ряд Фурье напряжения $U_{пк}$, содержащего только $U_{1п}$=1343 мВ, при погрешности $\varepsilon_T = 0{,}8\,\%$ напряжение гармоники U_{m2p}=10,6 мВ. Таким образом, максимальная относительная погрешность нахождения $U_{m2\partial}$ этой частоты в сигнале величиной $U_{пк}$ разложением в ряд Фурье по методу «постоянного периода» составит 25,4 %. Эта погрешность резко снизит достоверность результатов диагностирования. Однако этот метод можно применять, если замеряемая перед диагностированием частота в сети будет находиться в пределах 49,95–50,05 Гц.

Наиболее просто длительность периода можно определить методом «нулевых точек». Если известно аналитическое выражение напряжения $u_{пк} = f(t)$, то величину периода T определяет расстояние между соседними моментами времени t_a и $t_в$ с $u_{пк}$=0. При дискретном представлении напряжение $u_{пк} = f(t)$, пример которого приведен на рисунке 3.18,а точками.

Напряжение $u_{пк}$ практически всегда не равно нулю. В этом случае для нахождения точек t_a и $t_в$ с $u_{пк}$=0 применяют различные методы интерполяции – линейную, кубическую, кубическими сплайнами и т.д. Наиболее проста линейная интерполяция.

При линейной интерполяции положение точки $t_б$ определяется в соответствии с рисунком 3.18,б выражением

$$t_{б,p} = t_n + \frac{u_n}{u_n + u_{n+1}} \Delta t . \qquad (3.30)$$

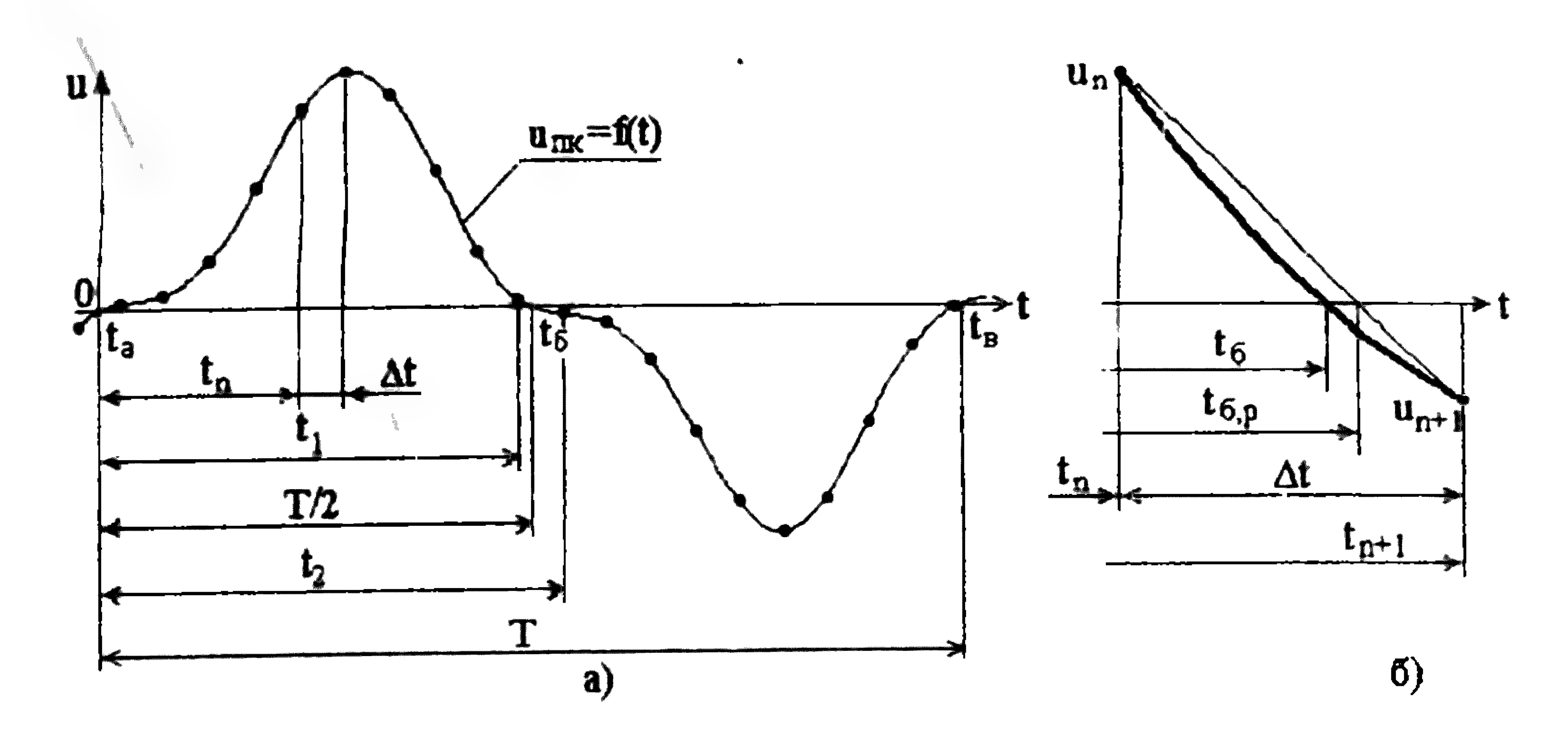


Рисунок 3.18 – Дискретизация электрического сигнала и расчетная схема определения периода при линейной интерполяции

Расчетное значение $t_б$ легко определится из аналитического выражения $u_{пк} = f(t)$ при значении $u_{пк}$=0. Тогда, относительная погрешность определения длительности периода составит

$$\varepsilon_T = \frac{|t_б - t_{б,p}|}{0{,}02} 100\% . \qquad (3.31)$$

Эта погрешность в основном зависит от частоты дискретизации, то есть от числа точек замера $u_{пк}$ на период. Ее величина практически равна нулю, если число этих точек на период целое. Если нет, максимально возможное значение $|t_б - t_{б,p}|$ не превышает величины $\Delta t / 2$. Из этого ясно, что при линейной интерполяции произвольной гармонической кривой увеличение числа узловых точек исследуемой функции приводит к уменьшению погрешности. Так, при количестве точек равном 400, что вполне обеспечивает разработанное программное обеспечение, погрешность определения точки с $u_{пк}$=0 в самом неблагоприятном случае не превысит 0,15 %. В этом случае погрешность измерения напряжения U_{1n} гармоники частотой f_1 и гармонических $U_{m2д}$ с частотами $f_{n2д} = \frac{f_1}{p}\left[(1-s) \mp sp\right]$ не превысит 0,3 %. Этого для реализации устройства диагностики более чем достаточно.

Время $t_{дмп}$ (рисунок 3.19) необходимое для набора достаточной информации ограничено пределами минимального $t_{дмп,\min}$ и максимального $t_{дмп,\max}$ времени диагностирования. Нижний его предел определяется по (2.13). Он зависит от скольжения и при s=0,01–0,05 для АД с $p=2$ составляет 0,792–3,9 с. Верхний предел зависит от типа АД, колебаний напряжения в сети и нагрузки на валу ротора, так как именно они определяют ток в обмотках двигателя и скольжение его ротора. В то же время он зависит от технических возможностей ПК. Экспериментально с учетом всех этих факторов установлено, что $t_{дмп,\max}$ можно принимать равным 120–300 с.

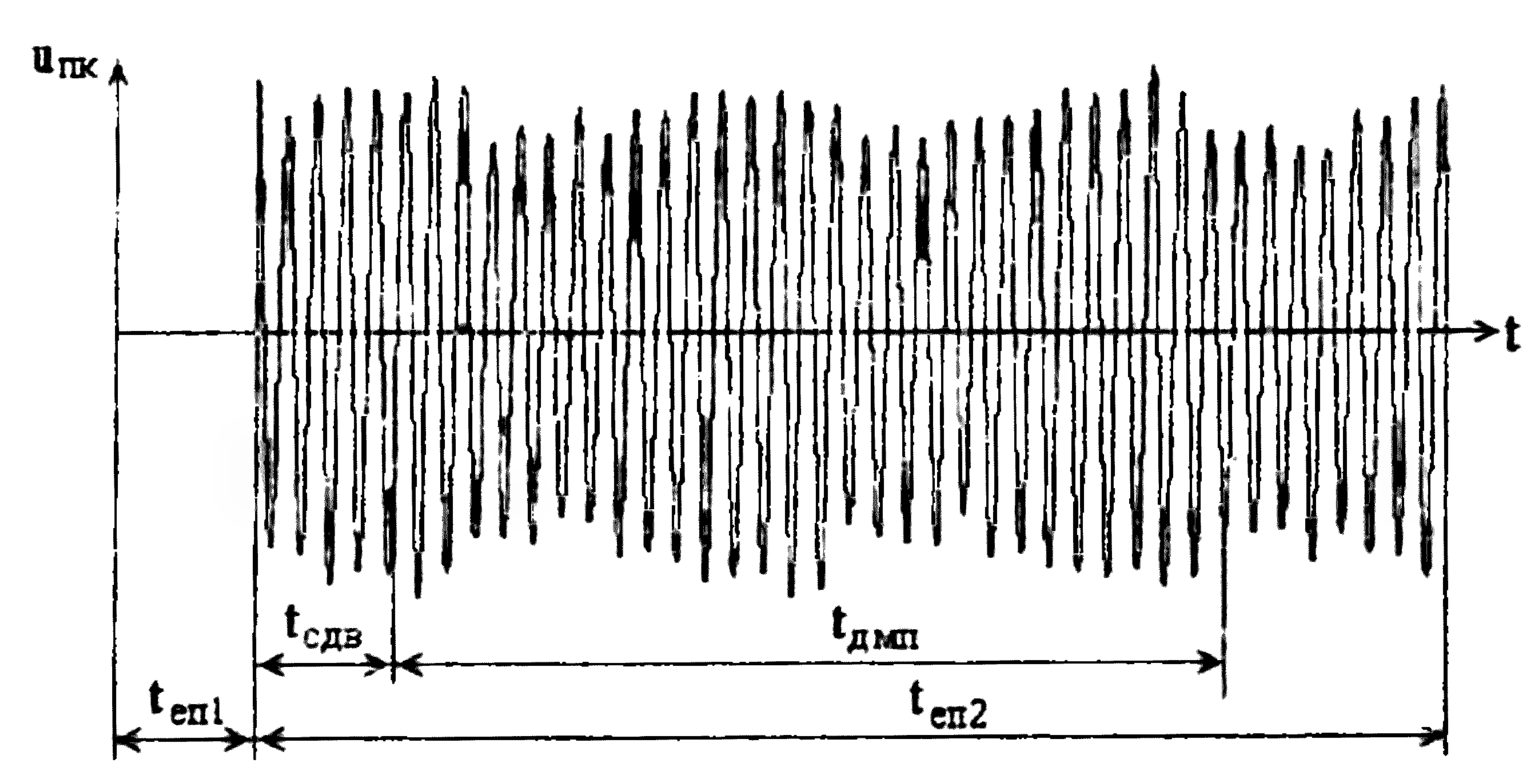


Рисунок 3.19 – Интервалы времени на осциллограмме напряжения на выходе измерительного щупа, используемые при организации алгоритма диагностики

Изменения величины напряжения в сети во времени хаотичны. Они вызваны постоянно меняющейся схемой сети в виде постоянного подключения и отключения различного вида нагрузки. Нагрузка на валу ротора также может иметь различный характер. Из рисунка 3.19 видно, что все это определяет характер изменения $u_{пк}$ во времени.

Комплексная оценка влияния изменений напряжения и нагрузки очень сложна, поэтому ее осуществляют следующим образом. Из имеющейся осциллограммы напряжения на выходе измерительного щупа длительностью $t_{еп2}$ выбираются участки с $t_{дмп}$ постоянной длины, но сдвинутые во времени на $t_{сдв}$. Это равнозначно получению информации в различное время. В качестве оценки влияния этих факторов на результаты диагностирования используется коэффициент

K_{u4}. Результаты расчета $K_{u4} = \dot{f}(t_{\tilde{n}\ddot{a}\hat{a}})$ приведены на рисунке 3.20,а. На основе анализа рисунка 3.20,а можно сделать вывод о неизменности K_{u4} за время проведения диагностики.

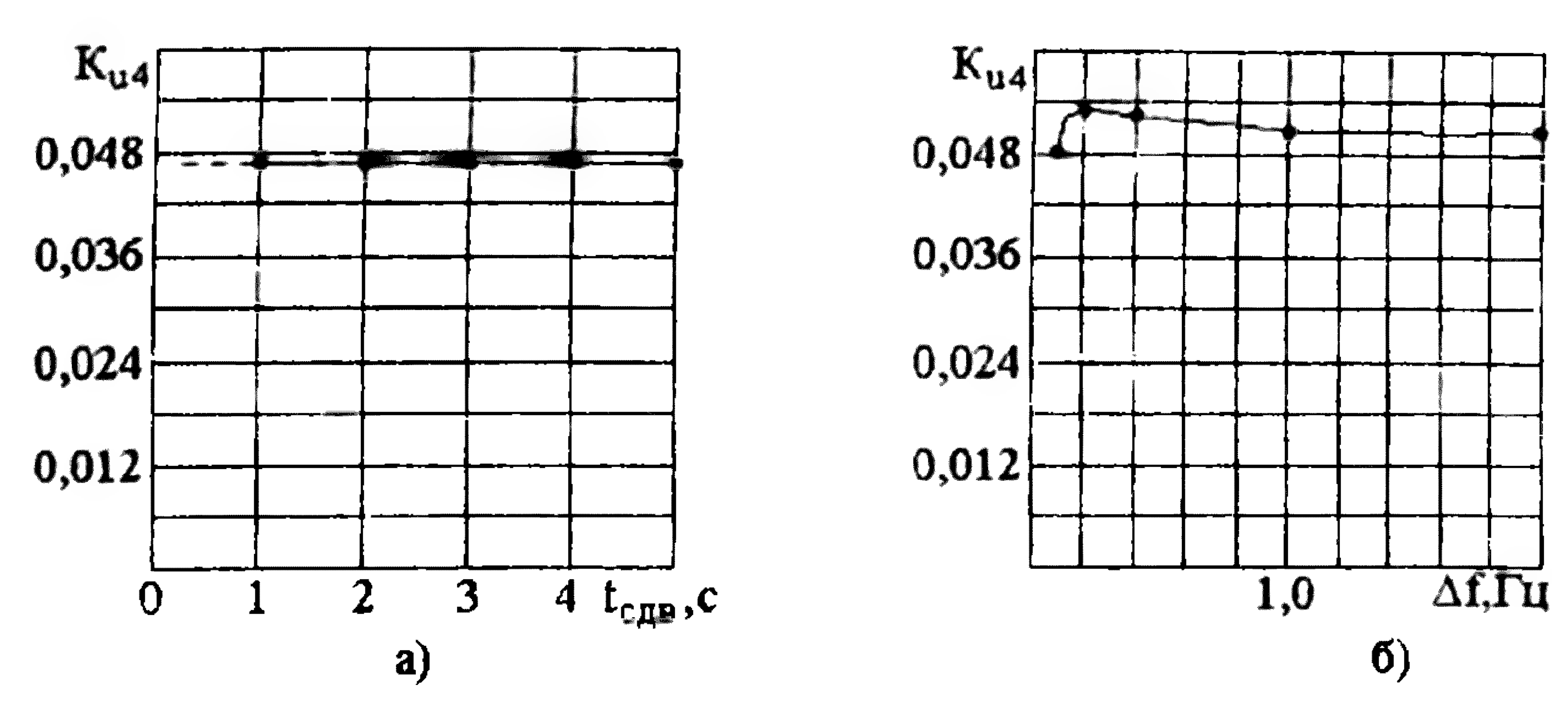


Рисунок 3.20 – Изменение величины коэффициент K_{u4} в зависимости от времени диагностики и величины шага Δf разложения в ряд Фурье

Оценка влияния изменения скольжения на результаты диагностики осуществлялась изменением коэффициента K_{u4} в зависимости от величины шага Δf разложения в ряд Фурье. Ведь именно он определяет погрешность измерения скольжения. Результаты расчета K_{u4} в зависимости от величины Δf показаны на рисунке 3.20,б. Из него видно, что при шаге Δf=0,2 – 1,0 Гц величина k_{u4} изменяется не боле чем на 5%. Есть все основания полагать, что при разложении в ряд Фурье, именно с таким шагом по частоте можно не учитывать влияние изменения скольжения за период диагностики. В этом случае максимальное время диагностирования $t_{дмп,\max}$ будет равно 5,0 – 10,0 с.

3.7 Реализация системы диагностики повреждений обмотки ротора на базе персонального компьютера типа Notebook

Наиболее доступным средством измерения и анализа сигналов с ТИП в настоящее время можно считать ПК. ПК относительно недороги, имеют достаточно высокие технические параметры и широко распространены. Их технический уровень таков, что они без особых затруднений позволяют осуществлять диагностирование АД с

помощью специализированных программ автоматического диагностирования.

Для измерения сигналов в условиях промышленного производства удобно воспользоваться переносными компьютерами типа Portable, Notebook или Penbook. В первые устанавливаются те же платы, что и в обычные компьютеры. Ряд модификаций второго и третьего типа имеет дополнительные входы по стандарту PC-Card. В этом же стандарте выпускаются звуковые карты или карты с устройствами ввода аналоговых сигналов.

Переносная система диагностики «беличьей клетки» АД на индукционных преобразователях строится на базе ПК с типовым набором аппаратных средств. Функциональная схема ПК для устройства диагностики повреждения «беличьей клетки» АД приведена на рисунке 3.21, где ОУ – объект управления; УСО – устройство сопряжения; ЦП – центральный процессор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЗУ – запоминающее устройство, жесткий диск; ОЗУ – энергозависимая оперативная память. Технические возможности этих аппаратных средств компьютера должны соответствовать следующим требованиям.

В качестве блока аналого-цифрового преобразования, в данном случае используется АЦП звуковой карты [93]. АЦП звуковой карты обладает широкими возможностями обработки данных. Даже простейшая из них в современном ПК позволяет обрабатывать сигналы с частотами 0–20000 Гц и частотой дискретизации 44000 Гц.

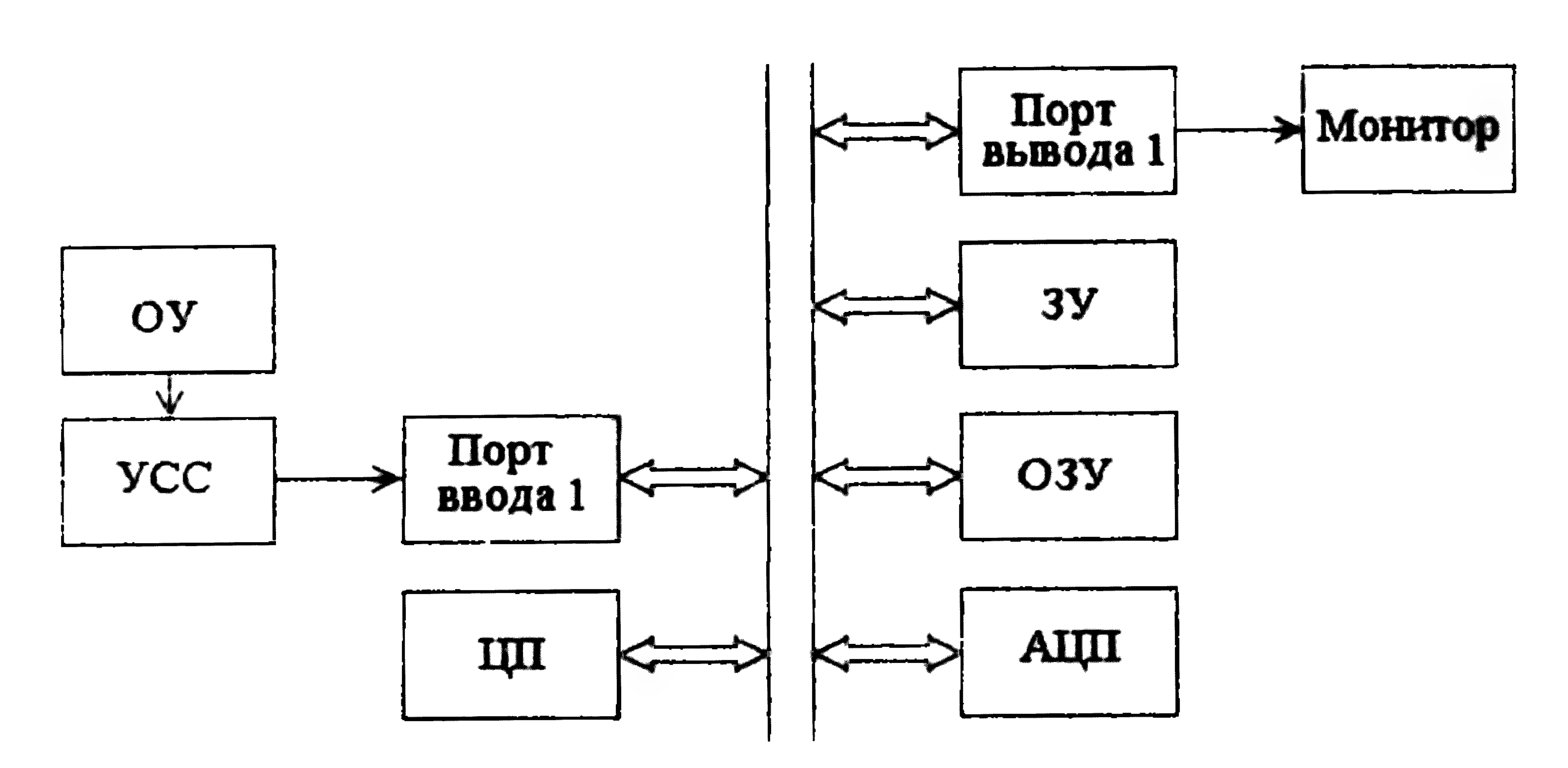


Рисунок 3.21 – Функциональная схема ПК для устройства диагностики повреждения «беличьей клетки» ротора

Основой звуковой карты является сигнальный процессор DSP, который выполняет такие задачи, как цифровая фильтрация и векторизация входных сигналов. Для того чтобы использовать его возможности, необходимо иметь непосредственный доступ к буферам, содержащим входные данные и управляющим режимом работы DSP, то есть использовать интерфейс низкого уровня.

Звуковая карта, как показано на рисунке 3.22, имеет два сдвоенных входа и два таких же выхода. Линейный вход рассчитан на сигналы с амплитудой около 1В, а микрофонный на сигналы 3–50 мВ. При использовании звуковой карты в качестве АЦП можно использовать любой из этих входов, но с целью уменьшения погрешностей измерения от внешних наводок предпочтение следует отдавать линейному входу. При этом не следует допускать, чтобы амплитуда сигнала превышала 1,5–2 В. Иначе, возможен выход устройства из строя. Хотя для корректных измерений уровень сигнала должен быть гораздо ниже от максимально допустимого значения, что также определяется типом звуковой карты. Для согласования подаваемого сигнала с входом звуковой карты используется измерительный щуп.

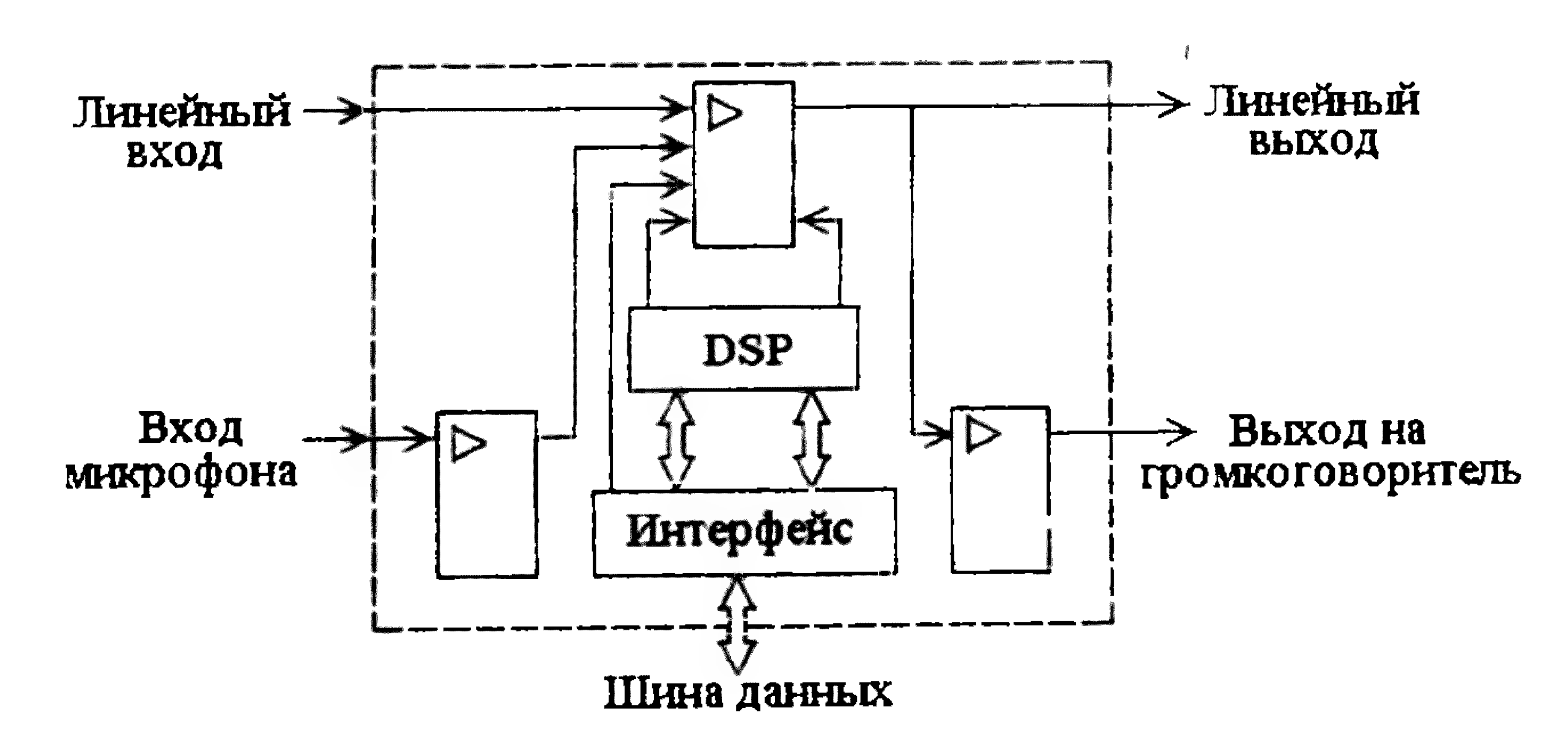


Рисунок 3.22 – Структурная схема звуковой карты

В справочных данных на новые звуковые платы или системные платы со звуковой подсистемой обычно приводят ссылки на совместимость их с требованиями стандарта AC 97 (Audio Codec 97). Кодек выполняют в виде отдельной микросхемы, размещенной в небольшом корпусе с 48–64 выводами. Его размещают на материнской плате максимально близко к входным разъемам, что минимизирует уровень шумов.

Однако применение звуковой карты в качестве АЦП имеет свои недостатки. Прежде всего, это уровень шумов. Его величина, как правило, не превышает 3–5 % от напряжения $u_{пк}$, а частоты не совпадают с частотами дополнительных гармонических. Поэтому при диагностировании их можно не учитывать.

Существенным недостатком звуковых карт является время включения и постоянная составляющая сигнала на входе. Но время включения составляет около 30 мс и повлиять на искажение $u_{пк}$ не может. К тому же от этого легко отстроиться. Постоянная составляющая сигнала на входе имеет отрицательную полярность и составляет около 0,06 В. Однако, при выделении гармонических из $u_{пк}$ путем разложения ее в ряд Фурье она в принципе не может повлиять на результаты диагностики.

Минимальным требованием к программному обеспечению ПК является наличие операционной системы Windows XP. В системное программное обеспечение входит интегрированная объектно-ориентированная среда программирования Borland Delphi 6.0 Enterprise.

Операционная система производит диалог с пользователем, осуществляет управление компьютером, его ресурсами (оперативной памятью, местом на дисках и т.д.), запускает прикладные программы на выполнение. Так как это управляющий программный комплекс, то он в свою очередь накладывает требования к аппаратным средствам.

Для реализации устройства требуется следующая аппаратная платформа:

- Pentium-совместимый процессор с частотой 133 МГц или выше;
- 64 Мб оперативной памяти;
- жесткий диск должен иметь объем примерно 2 Гб, на котором не менее 650 Мб свободного места;
- звуковая карта с частотой дискретизации 48 кГц;
- дисковод для компакт-дисков CD-RW;
- монитор VGA;
- мышь Microsoft Mouse или другое совместимое указывающее устройство.

Для написания прикладной программы системы диагностики повреждения «беличьей клетки» АД «Спектр ПК-02» была выбрана интегрированная объектно-ориентированная среда программирования Borland Delphi 6.0 Enterprise. На сегодня Delphi является одним из самых распространенных средств создания приложений. Эти средства позволяют создавать прикладные программы, предназначенные для

работы на ПК под управлением оболочки Windows XP, а также операционной системы Windows NT и использующие общепринятые для Windows элементы пользовательского интерфейса. Программы такого типа в настоящее время признаны в качестве стандарта, поскольку наиболее широко распространены, удобны для пользователей и не требуют дополнительного изучения.

Программа «Спектр ПК-02», разработанная в среде Delphi, использует функции высокого уровня для работы со звуковой картой, так называемые WinAPI-функции операционной системы, что накладывает некоторые ограничения на используемое программное обеспечение.

Win API - это набор функций, предоставляемых операционной системой, начиная с версии Windows 95. Эти функции находятся в стандартных динамически компонуемых библиотеках (Dynamic Linked Library, DLL), таких как kernel32.dll, user32.dll, gdi32.dll. Эти файлы находятся в директории Window\System.

Реализуемое устройство диагностики на базе Notebook «Спектр ПК-02», предназначено для регистрации, визуализации, обработки и хранения аналоговых сигналов. Оно может работать в ручном и автоматическом режиме и имеет следующие функциональные модули:

- регистрация входного сигнала;
- воспроизведение измеряемого сигнала в виде временной зависимости;
- проведение спектрального анализа;
- отображение сигнала в виде спектра частот составляющих гармоник;
- отображение характеристик сигнала (A_ν, φ_ν) в табличном виде;
- файловые операции (сохранение информации в файл, открытие существующего файла данных, печать);
- экспорт данных;
- настройка параметров прибора.

Пользовательский интерфейс программы «Спектр ПК-02» состоит из набора рабочих панелей (окон), каждая из которых содержит набор управляющих элементов (УЭ), позволяющих оператору влиять на работу программы, и индикаторов, отображающих необходимую информацию. Большинство этих элементов являются частью стандартного интерфейса Windows и не требуют специальных объяснений по использованию. Легкость освоения программы обеспечивается также наличием «всплывающих подсказок» - кратких текстовых пояснений по использованию каждого

элемента. Для управления прибором можно также использовать команды выпадающего меню основной рабочей панели.

В связи с тем, что в системе диагностики могут использоваться один или два ТИП, а измерение скольжения может осуществляться с помощью геркона или косвенно по гармоническим, то возможны несколько вариантов построения алгоритма. На рисунке 3.23 показан алгоритм прикладной программы системы диагностики повреждения «беличьей клетки» АД «Спектр ПК-02» с одним ТИП и косвенным измерением скольжения.

В автоматическом режиме система диагностики работает следующим образом. После подключения и настройки системы диагностики с клавиатуры включается режим ВВОД ДАННЫХ в котором вручную вводятся число пар полюсов асинхронного двигателя p, номинальное скольжение s_n, расчетные значения зоны перемещения Δf, коэффициента отстройки $k_{отс}$ принимаемого равным 1,2-1,5 и функциональные зависимости критериев $K_{и3} = f(s)$ и $K_{и4} = f(s)$ от скольжения. По введенным данным определяется время диагностики $t_{äïi}$, время сдвига $t_{сдв} = (0{,}1 \div 0{,}5)t_{дмп}$ и порог срабатывания порогового элемента, определяемый как $K_{и3ср}(s) = k_{отс}K_{и3}(s)$. Затем в течение времени $t_{сдв} + t_{дмп}$ фиксируется в память сигнал $e_n = f(t)$, а результаты записи $e_n = f(t)$ длительностью $t_{дмп}$ разлагают в ряд Фурье. В зоне перемещения с граничными частотами $f_1/p[(1-s_n) \mp ps_n]$ выявляют две гармонические с наибольшими амплитудами, где s_n - номинальное скольжение ротора АД по паспорту. Ими являются ЭДС с частотами $f_1/p[(1-s) \mp ps]$. По их амплитудам и частотам определяется текущее значение скольжения ротора АД и коэффициента $K^*_{и3} = (E_{n2д1} + E_{n2д2})/(\dot{E}_{n1} + \dot{E}_{n2})$, где Δf_b – разность частот $f_1/p[(1-s) \mp ps]$ ЭДС.

По параметрам этих гармонических определяется текущее значение скольжения АД и коэффициента $K^*_{и3} = (E_{n2д1} + E_{n2д2})/(\dot{E}_{n1} + \dot{E}_{n2})$. В пороговом элементе $\hat{E}^*_{и3}$ сравнивается с порогом срабатывания $K_{и3ср}$ при полученном скольжении. Если окажется что $\hat{E}^*_{и3} < K_{и3ср}$, то блок индикации БИ выдаст информацию РОТОР ЦЕЛ. Если $K_{и3ср} < \hat{E}^*_{и3} < K_{и4}$, то блок индикации БИ выдает информацию ЧАСТИЧНЫЙ ОБРЫВ

СТЕРЖНЯ. Если $\dot{E}_{и3} > K_{и4}$, то блок индикации БИ покажет ОБРЫВ СТЕРЖНЯ.

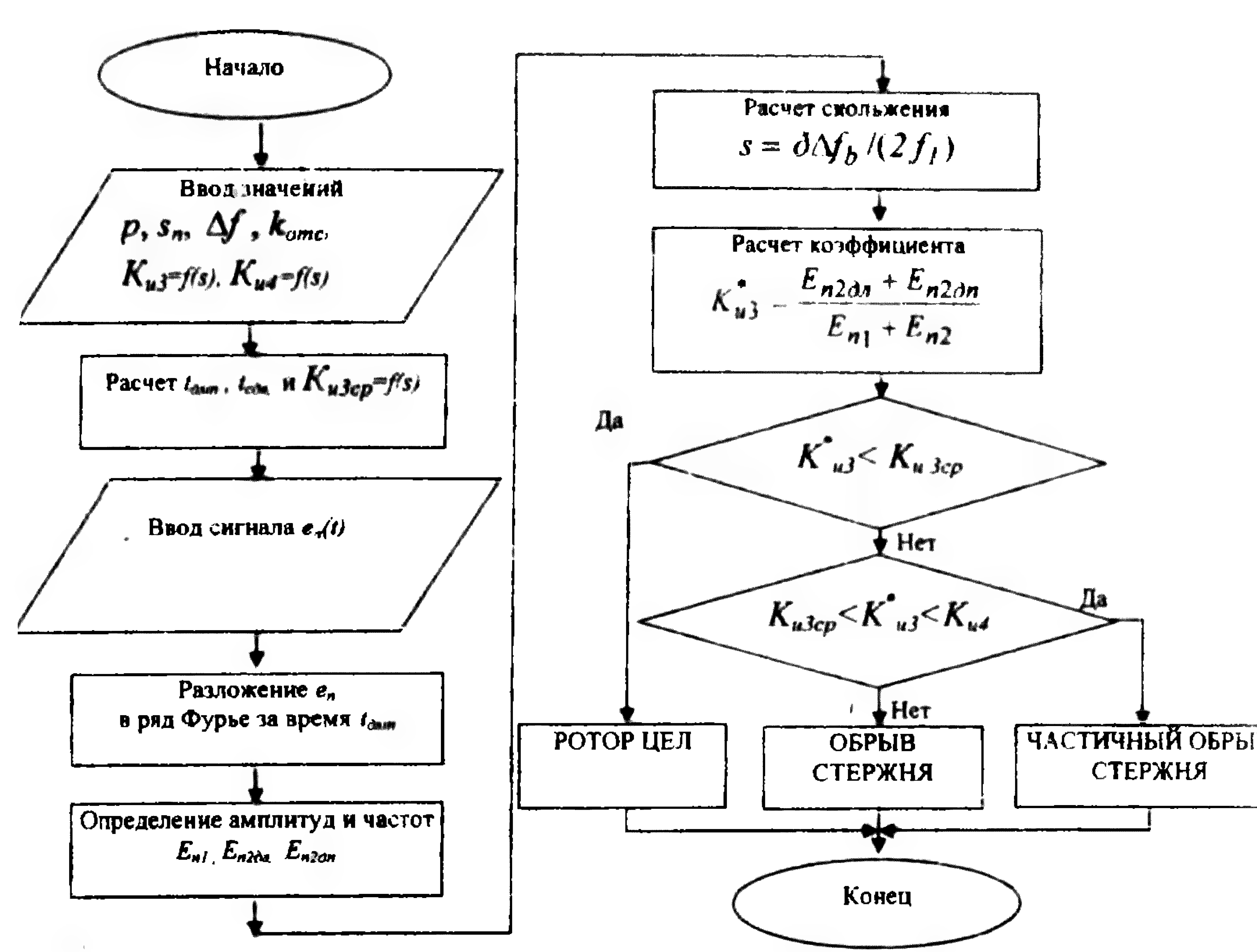


Рисунок 3.23 – Алгоритм устройства диагностики без измерения скольжения

Как показали многочисленные эксперименты, диагностика дает хорошие результаты при шаге разложения Δf=(0,1 – 0,2) Гц и времени диагностирования 5-10с. При этом нагрузка должна быть неизменной. Логическая часть алгоритма построена с учетом рисунка 6,б. Рассмотренный вариант устройства является наиболее простым.

3.8 Выводы

а) Предложенная математическая модель пространственных магнитных полей статора и ротора в торцевой зоне асинхронного двигателя, уравнения которой составлены с учетом метода зеркальных отражений с коррекцией, позволяет с погрешностью до 5–10 % в

самом неблагоприятном случае моделировать эти поля в двигателях с корпусом как из ферромагнитного, так и алюминиевого сплава.

б) Предложенные методы моделирования магнитных потоков на внешней поверхности торцевого или подшипникового щита из ферромагнитного и алюминиевого сплава позволяют определять их с погрешностью не превышающей 20–25 %.

в) Разработанные измерительные щупы просты в эксплуатации, защищают АЦП ПК от выхода из строя при перенапряжениях, позволяют получать напряжение на его выходе желаемой величины и дают возможность реализовать алгоритм определения текущей длительности периода.

г) Результаты расчетов и экспериментов показали, что для определения длительности периода основной гармоники реального сигнала можно использовать метод «нулевых точек», который при частоте дискретизации 8000 Гц используемого АЦП способен обеспечить погрешность не превышающую 0,62 %.

д) При построении системы диагностики повреждения «беличьей клетки» наиболее приемлемы ПК с материнскими платами, которые имеют встроенную звуковую карту комплекта Sound System Version 1.0.

е) Система диагностики повреждения «беличьей клетки» на базе ПК с программным обеспечением «Спектр ПК-02» способна в ручном режиме и автоматически с достаточной точностью регистрировать, визуализировать, обрабатывать и хранить аналоговые сигналы различной длительности, а также выдавать результаты диагностики в виде «ротор цел», «частичный обрыв стержня», «обрыв стержня».

ж) Экспериментальные исследования показали, что система диагностики повреждения «беличьей клетки» на базе ПК с программным обеспечением «Спектр ПК-02» проста в эксплуатации и может применяться практически с любым ПК при наличии в нем звуковой карты и навыков работы на ПК.

Заключение

В работе дано новое решение актуальной научной задачи – построения систем диагностики короткозамкнутого ротора АД СН электрических станций на индукционных преобразователях. Основные научные и практические результаты, полученные в работе, заключаются в следующем:

1) предложен новый метод моделирования токов в короткозамкнутом роторе АД при обрыве в нём нескольких стержней, которые ищут в виде токов в АД до повреждения стержней и дополнительных токов;

2) показано, что предлагаемый метод формирования математической модели АД позволяет значительно упростить традиционную математическую модель АД с фазовыми координатами за счет уменьшения в полтора раза количества ее дифференциальных уравнений;

3) доказано, что обрыв стержней в короткозамкнутом роторе АД приводит к повышению расхода электроэнергии, сопоставимому за год эксплуатации со стоимостью самого двигателя;

4) предложено использовать в качестве информационного признака обрыва стержней в короткозамкнутом роторе коэффициент K_{u4}, величина которого зависит от скольжения ротора и определена отношением суммы дополнительных гармонических с частотами $f_1/p[(1-s)\mp ps]$ к основной гармонике в ЭДС точечного индукционного преобразователя, индуцируемой внешним магнитным полем АД;

5) разработан способ диагностики повреждений короткозамкнутого ротора, основанный на определении порога срабатывания с помощью датчика скольжения на герконе;

6) разработан способ диагностики повреждений короткозамкнутого ротора, основанный на определении порога срабатывания по скольжению, определяемому по частотам дополнительных гармонических $f_1/p[(1-s)\mp ps]$;

7) предложен способ расчета трехмерного внутреннего и внешнего магнитного поля в торцевой зоне АД с ферромагнитным и алюминиевым корпусом, а также с целым и поврежденным ротором, основанный на методе зеркальных отражений с коррекцией токов крайних отражений;

8) разработаны конструкции измерительного щупа и алгоритмы работы системы диагностики повреждений короткозамкнутого ротора на базе ПК.

Литература

1 Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины // – М. : Энергия, 1980. – 909 с.

2 Казанский В. Е. Измерительные преобразователи тока в релейной защите. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 240 с.

3 Корогодский В. И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1000 В / Корогодский В. И., Кужеков С. П., Паперно Л. Б. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 248с.

4 Гимоян Г. Г. Релейная защита горных электроустановок. – М. : Недра, 1978. – 349с.

5Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем. – М. : Энергия, 1976. – 559 с.

6 Чернобров Н .В. Релейная зашита. – М. : Энергия, 1974. – 680 с.

7 Андреев В. А. Релейная защита, автоматика и телемеханика в системе электроснабжения. – М. : Высшая школа, 1975.– 391с.

8 Беркович М. А., Семенов В. А. Основы автоматики энергосистем / М. А. Беркович, В. А. Семенов. – М. : Энергия, 1968. – 432 с.

9 Афанасьев В. В. Трансформаторы тока / Афанасьев В. В. [и др.]. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.

10 Волохов С. А.. Диагностирование обрыва стержня клетки ротора асинхронного электродвигателя / С. А. Волохов, П. Н. Добродеев, А. В. Кильдишев. – Электротехника. – 1998. – № 2. – С. 13÷15.

11 United States Patent 3.970.897. Detector and apparatus incorporating the same for detecting phase–asymmetry and protecting there–phase motors against dangerous operating condituons. D. Tamir, M. S. Erlicki. – 1974. – Apr. 22.

12 Вавв, M. Fault detection system monitors the health of AC induction motors. Control engineering. – nr 4.– 1988. – s. 86÷87.

13 Андреева О. А. Особенности конструкции индукционных преобразователей для релейной защиты и диагностики асинхронного двигателя / О. А.Андреева, А. Н. Новожилов, Т. А.Новожилов // Вестник ПГУ. – 2007. – №4.– С. 87–112.

14 А. с. № 756536. СССР. Устройство для защиты генератора переменного тока // Утляков Г. Н., Куляпин В. М. и др. Опубл. 15.08.80.

15 А. с. № 1182605. СССР. Асинхронный электродвигатель с блоком защиты // Завгородний В. Д., Чучман Ю. И., Волошанский Е. В. Опубл. 30.09.85.

16 А. с. № 1129701. СССР. Асинхронный электродвигатель с блоком защиты // Завгородний В. Д., Павлович Н. В., Неверкла С. В. Опубл. 15.12.84.

17 А. с. № 1249655 СССР. Асинхронный электродвигатель с блоком защиты// Завгородний В. Д., Павлович Н. В. и Нестерук М . П. Опубл. 07.08.86.

18 А. с. № 1492421. СССР. Электрическая машина с датчиком внутренних повреждений обмотки статора // Церазов А. Л., Соколов В. Л., Трегубов Н. С. Опубл. 07.07.89.

19 А. с. № 1387108. СССР. Электрическая машина с блоком контроля внутренних повреждений обмотки // Церазов А. Л., Соколов В. Л. Опубл. 07.04.88.

20 А. с. № 917136. СССР. Устройство для обнаружения повреждений стержней короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя // Рассказчиков А. В., Савельев В. А. и др. Опубл. 30.03.82.

21 А. с. № 1653077. СССР. Электрическая машина // Каплунов В. Б., Кузьмин В. В. и др. Опубл. 30.05.91.

22 А. с. № 1205234. СССР. Электрическая машина с устройством контроля витковых замыканий в обмотке ротора // Фащук В. И., Благой В. М., Коробков В. А. Опубл. 15.01.86.

23 А. с. № 1095315. СССР. Обмотка электрической машины или аппарата // Бурыкин В. В., Савельев В. А., Павлов Г. М. Опубл. 07.01.92.

24 А.с. № 1704236. СССР. Синхронная электрическая машина с устройством для измерения угла выбега ротора // Ахматов М.Г., Ахматова В.М., Камалов Н.Б., Пирматов Н.Б., Салимов Д.С. Опубл. 07.01.92.

25 А.с. № 1046852. СССР. Электрическая трехфазная машина с встроенным блоком для защиты от повреждений обмотки статора // Клецель М.Я., Новожилов А.Н., Поляков В.С. Опубл. 07.10.83.

26 А.с. № 1046826. СССР. Электрическая трехфазная машина // Клецель М.Я., Новожилов А.Н., Поляков В.С., Солодухин И.Н., Чепелюк Я.З., Байда Д.Ф. Опубл. 07.10.83.

27 United States Patent 4.453.190. Method of short circuit protection of electrical three-phase machine and device there – for. M. Y. Kletzel, V. E. Polyakov, A. N. Novozhilov, I. N. Solodukhin, Y. Z. Chepeljuk, D. E. Baida. – 1984. – Jun.5.

28 Brevet d'inventicn Republidue, Francaise 2.505.570. Procede de protection d'une machine electrigue a icurant triphase contre les courts-circuits et dispositifs pour la mise enleuvre. M. Y. Klezel, V. E. Polyakov,

A. N. Novozhilov, I. N. Solodukhin, Y. Z. Chepeljuk et D. E. Baida. – 1986. – № 29.

29 Patentschrift DE 3216864 C2. Vorrientund zum Schutz elektriseher Drehstrommasehinen vor Kurzschussen. Klezel M. J., Polljakov V. E., Novozhilov A. N., Soloducin J. N., Tsepeljuk J. S., 16.6.88

30 А. с. № 1046853 СССР. Электрическая машина // Клецель М. Я., Новожилов А. Н. Опубл. 07.10.83.

31 Дьяков А. В. Электроэнергетика мира – состояние, проблемы (по материалам 38–й сессии СИГРЭ, Париж) / Ишкин В. Х., Мамиконянц Л. Г. // Энергетика за рубежом. Выпуск 5–6, 2001. С. 104–106.

32 Какуевицкий Л. И., Смирнова Т. В. Справочник реле защиты и автоматики/ Л.И.Какуевицкий, Т. В. Смирнова – М. : Энергия, 1972. – 344 с.

33 Ермолин Н. П. Надежность электрических машин. / Ермолин Н. П., Жерихин И. П. – Л. : Энергия, 1976.– 247 с.

34 Таджибаев А. И. Современные методы и средства диагностирования электромагнитной системы асинхронных двигателей/ А. И. Таджибаев, М. П. Цыпкин // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 3: Диагностика, контроль состояния, релейная защита и обслуживание электродвигателей. – С. – Пб. : ПЭИПК. – 1997. – С.50–54.

35. Гемке Р. Г. Неисправности электрических машин. – Л. : Энергия, 1975. – 296 с.

36 О причинах обрыва стержней короткозамкнутых роторов / В. М. Высоцкая, В. И. Елгазин, Т. Ю. Могилевская // Изв. вузов. Электромеханика. – 1961. – № 1. – С. 143–144.

37 Subhasis N. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines – a review / Subhasis, N., Hamid A. Toliyat //Electric Machines & Power Electronics Laboratory, Texas University.

38 Андреева О.А. Метод численного моделирования работы асинхронного двигателя с обрывом стержней в короткозамкнутом роторе / О.А.Андреева, А.Н. Новожилов, А.П.Кислов //Электричество. – 2004. – №11. – С. 41–45.

39 Андреева О. А. Энергопотребление асинхронного двигателя при обрыве стержней и эксцентриситете короткозамкнутого ротора / О. А. Андреева, А. Н. Новожилов, А. П. Кислов. // Вестник ПГУ. – 2004. – №1 – С.204–217.

40 Петров Г. Н. Электрические машины, ч.2. Асинхронные и синхронные машины. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.

41 Копылов И. П. Математическое моделирование электрических

машин. – М. : Высш. шк. 1994. – 318 с.

42 Геллер Б. Высшие гармоники в асинхронных машинах./ Геллер Б., Гамата В. –М. : Энергия, 1981. – 352 с.

43 Токи в стержнях различного сопротивления демпферной обмотки мощного тихоходного двигателя / К. С.Демирчан, И. З. Богуславский // Изв. АН СССР. – Энергетика и транспорт, 1980. – № 2. – С. 38–44.

44 Токи в несимметричной короткозамкнутой клетке ротора / И. З. Богуславский // Энергетика и транспорт. Изв. АН СССР.– 1982. – №1. – С. 71–76.

45 Расчет токов в беличьей клетке ротора при дефектах у нескольких стержней / Никиян Н. Г., Йондем М. Е., Бояджян С. С. // Электричество. – 1991. – №5.– С. 66–68.

46 Уманцев Р. Б. Конструкция и ремонт короткозамкнутых роторов крупных двигателей. – М. : Энергия, 1976. – 77 с.

47 А. с. № 800906 (СССР). Способ определения повреждений стержня беличьей клетки роторов асинхронных электродвигателей / Брюханов Г. А., Князев С. А. Опубл. 1981, Бюл. №4.

48 Метод и устройство для диагностики состояния роторных обмоток асинхронных двигателей / Г.А.Брюханов, С.А. Князев // Электрические станции. – 1986. – №2. – С. 44–45.

49 Таран В. П. Диагностирование электрооборудования. – Киев: Техника, 1983. – 200 с.

50 Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин. –М.–Л. : – ГЭН, 1969. – 690с.

51 Гармаш В. С. Метод контроля неисправности стержней ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя // Изв. вузов. Энергетика. – 1990. – № 10. – С. 50–52.

52 Диагностика состояния короткозамкнутых роторов асинхронных машин / В. Ф. Сивокобыленко, Нури Абделбассет // Электричество. – 1997. – №3. – С.25–26.

53 Reinhardt. Методы обнаружения повреждений короткозамкнутых клеток роторов асинхронных машин. – «25. Int.Wiss. Kollog, Ilmenau, 27–31 Okt. 1980, Heft 2,Vortrag–sr, A2» Ilmenau. S.105–108.

54 Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В. Петухов, В. Соколов // Новости электротехники. – 2005. – №1(31). – С. 18–22.

55 А. с. №1121633. СССР. Способ контроля обрыва стержня ротора короткозамкнутого асинхронного электродвигателя./ М. А. Гашимов, Н. А. Аскеров. Опубл 30.10.84, Бюл. №40.

56 Выявление неисправности стержней ротора асинхронных электродвигателей / М. А. Гашимов, Н. А. Аскеров // Электрические станции. – 1984. – №8. – С. 60-62.

57 Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors / G. B. Kliman, R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott, M. W. Madden // IEEE Trans. Energy Conv. vol. EC–3, no.4, pp.873–879, Dec. 1988.

58 On-line current monitoring for fault diagnosis in inverter fed induction motors / W. T. Thomson, and I. D. Stewart // IEEE Third international conference on power electronics and drives, London, – 1988. – Pp. 432–435.

59 F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas, "AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect", IEEE–IAS Annual meeting conference, San Diego, Oct 6– 10, 1996. – Pp. 655–662.

60 N. M. Elkasabgy, A. R. Eastham, G. E. Dawson. Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine. IEEE Trans. Ind. Applns., vol. IA–22, no.6, Jan./Feb. 1992. – Pp. 165–171.

61 B. G. Gaydon. An instrument to detect induction motor rotor circuit defects by speed fluctuation measurements. Electric test and measuring instrumentation – Testmex 79 conference papers, 1979. – Pp. 5–8.

62 Condition monitoring of electrical drives / J. Penman, M. N. Dey, A. J. Tait, W. E. Bryan, IEE Proceedings, vol. 133, pt. B, no.3, May 1986. – Pp. 142–148.

63 United States Patent 3.970.897. Detector and apparatus incorporating the same for detecting phase-asymmetry and protecting there-phase motors against dangerous operating conditiuons. D. Tamir, M. S. Erlicki. – 1974. – Apr. 22.

64 A. c. №1273850. СССР. Способ обнаружения дефектов короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя / А. В. Барков, М. П. Цыпкин [и др.]. Опубл 30.11.86, Бюл. №44.

65 Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry / V Thorsen and M Dalva , Proc 8a IEE Int Conf, EMD'97, University of Cambridge. – 1997. – No 444, pp. 109–113.

66 Case Histories of Rotor Winding Fault Diagnosis in Induction Motors / W. T. Thomson and D. Rankin, 21 1 Int. Conf. Proc. on Condition Monitoring, University College Swansea, March 1987.

67 Induction Motor Fault Detection Via Passive Current Monitoring / G..B. Kliman and J Stein, Proc. Int. Conf. (ICEM'90), MIT, Boston, USA, 1990, – Pp. 13–17.

68 On-line Current Monitoring and Fault Diagnosis in High Voltage Induction Motors – Case Histories and Cost Savings in Offshore Installations/ W. T. Thomson, S. J. Chalmers and D. Rankin, Offshore Europe '87, Conf. Proc. SPE, September 1987, Aberdeen, SPE 16577/1 – SPE 16577/10.

69 Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring/ R Randy. Schoen, Thomas G. Habetler, – IEEE transactions on industry applications, vol.31, no. 6, November/December 1995

70 Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults/ William T.Thomson, Mark Fenger. – IEEE Industry Application Magazine July/August 2001.

71 Харкевич А. А. Спектры и анализ. – 4-е изд. М. : Гос. изд-во физико-мат. лит-ры, 1962. – 186 с.

72 Цифровая регистрация и анализ аварийных процессов в электроэнергетических системах. – М. : НТФ «Энергопрогресс», [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик», Вып: 2(62)], – 2004. – 96 с. :ил.

73 Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – 13-е изд., исправл. – М. : Наука, 1986. – 282 с.

74 Гутников В. С. Фильтрация измерительных сигналов. Л. : Энергоатомиздат, Ленинградское отд-ние, 1990. – 185 с.

75 Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М. : Энергоатомиздат. – 1984. – 240 с.

76 Новожилов А. Н. Математическое моделирование эксплуатационных и аварийных режимов работы асинхронных двигателей // Электричество. – 2000. – № 5. – С. 37–41.

77 Андреева О. А. Метод формирования системы уравнений математической модели электрических машин и трансформаторов в эксплуатационных режимах / О. А. Андреева [и др.] // Омский научный вестник . – 2006. – № 9(4). – С. 108–112.

78 Копылов И. П. Проектирование электрических машин/. Копылов И. П., Горяинов Ф. А., Клоков Б. К. [и др.] – М. : Энергия, – 1980. – 495 с.

79 Шоффа В. Н., Чингишев А. А. Магнитоуправляемые контакты в автоматике и связи. – Фрунзе. Кыргызстан, – 1991. – 265 с.

80 Предварительный патент № 13724 KZ. Устройство диагностики эксцентриситета ротора асинхронного двигателя / О. А. Андреева [и др.]. Опубл. 14.11.2003. Бюл. № 11. – 4 с.

81 Гринберг Г. А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – М. : АН СССР, 1948. – 325 с.

82 Данилевич Я. Б. Добавочные потери в турбо- и гидрогенераторах. – Л. : Наука, 1973. – 188 с.

83 Коррекция токов в методе зеркальных отражений при моделировании магнитных полей электрических машин / А. Н. Новожилов, М. П. Воликова // Электричество. – 2004. – № 9.

84 Новожилов А. Н. Методика расчета ЭДС точечных измерительных преобразователей защит электродвигателей // Известия ВУЗов. Энергетика. 1990. №11. – С. 23–28.

87 Андреева, О. А. Моделирование магнитных полей методом зеркальных отражений с коррекцией токов для синтеза защит электрических машин/ О. А. Андреева [и др.] // Электричество. – 2008. – № 11. – С. 43–48.

88 Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. – М. : Высшая школа, 1973. – 588 с.

89 Расчет трехмерного внешнего магнитного поля синхронной машины в зоне лобовых частей обмоток / И. Т. Талышинский, М. В. Любицкий // Электроника. – 1974. – № 5. – С. 4–8.

90 Трехмерное внешнее магнитное поле асинхронных машин / И. Т. Талышинский, Ф. Ф. Уразов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1973 – № 5. – С. 124–128.

91 Магнитное поле вала асинхронного двигателя / Новожилов А. Н., Кислов А. П. // Электротехника. – 2001. – № 7. – С. 16–19.

92 Бинс К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей/ К. Бинс, П. Лауренсон – М. : Энергия. – 1970. – 376 с.

93 Аналогово–цифровой преобразователь из звуковой карты / Барановский О. // Радиолюбитель. – 1998. – № 3. – С. 8–9.

94 Калантаров П. Л. Расчет индуктивностей: Справочная книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.

95 Копылов И. П., Горяинов Ф. А., Клоков Б. К. и др. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков. – М. : Энергия, –1980. – 495 с.

96 ГОСТ 13109–97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения.

97 Андреева О. А. Особенности использования рядов Фурье при построении системы диагностики электрических машин / О. А. Андреева [и др.] // Вестник ПГУ. – 2005. – № 1. – С. 109-110.

98 Андреева О. А. Диагностика роторов электрических машин, используемых в собственных нуждах электростанций. / О.А. Андреева [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 1. – С. 238–241.

Приложение А
(справочное)

Обозначения и сокращения

АД	– асинхронный двигатель;
q	– число пазов на полюс и фазу;
τ	– полюсное деление статора;
КИП	– кольцевой индукционный преобразователь;
ТИП	– точечный измерительный преобразователь;
ПУЭ	– правила устройства электроустановок;
$d_{пр}$	– диаметр проводника
$w_п$	– число витков в катушке ТИП
P, Q	– активные и реактивные электрические потери в фазах;
R_2, X_2	– активное и индуктивное эквивалентные сопротивления фаз короткозамкнутой обмотки;
I_2	– ток фазы ротора;
R_c (R_k), X_c (X_k)	– активное и индуктивное сопротивления стержня (участка кольца);
I_c, I_k	– токи в стержне и участке кольца;
z_2	– количество стержней ротора
k_r, k_x	– коэффициенты пропорциональности активных и реактивных потерь поврежденного и неповрежденного ротора
P^*, Q^*	– активные и реактивные электрические потери в фазах поврежденного ротора;
$\Delta З_{ээ}$	– дополнительные затраты на электроэнергию
ΔP	– дополнительные потери электроэнергии в фазах поврежденного ротора;
$n г$	– число часов работы ;
$Ц_{ээ}$	– тариф на электроэнергию;
$\dot{I}^*_{ci}, \dot{I}^*_{ki}$	– токи в i–ом стержне и элементе кольца при повреждении «беличьей клетки»;
$\dot{I}_{ci}, \dot{I}_{ki}$	– токи в i–ом стержне и элементе кольца «беличьей клетки»;
$\Delta\dot{I}_{ci}, \Delta\dot{I}_{ki}$	– добавочные токи в i–ом стержне и элементе кольца;
$I_{фi}$	– ток в i–ой фазе;
α	– угол сдвига фаз статора и ротора АД;
p	– число пар полюсов АД;

ЭДС – электродвижущая сила;

E_{ci}, E_{ki} – ЭДС стержней и фаз обмотки ротора;

Z_c, Z_k – сопротивление стержня и элемента кольца

$\dot{U}_1, \dot{I}_1, Z_1$ – напряжение, ток и сопротивление фазы статора;

$\dot{I}_0, \dot{E}_0$ – ток и ЭДС холостого хода;

s – скольжение ротора;

ω_1, ω_2 – угловые скорости вращения поля статора и ротора;

I_2', Z_2' – ток и сопротивление обмотки ротора, приведенные к статору;

k_I, k_Z – коэффициенты приведения токов и сопротивлений;

m_1, m_2 – число фаз статора и ротора;

k_{01}, k_{02} – обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора;

w_1, w_2 – число витков в фазах статора и ротора;

Z_0 – главное сопротивление ;

R_0, X_0 – активное и реактивное сопротивление схемы замещения;

L_{11} – главная индуктивность схемы замещения;

$P_м$ – магнитные потери;

μ_0, μ_c – магнитная проницаемость вакуума и стали;

l_δ, δ – длина и величина воздушного зазора;

k_δ – коэффициент Картера;

$[U], [I]$ – субматрицы напряжений и токов в обмотках статора и ротора по осям α и β;

$[Z]$ – матрица сопротивлений;

Мэ – электромагнитный момент;

M –взаимная индуктивность статора и ротора;

$[I_s, I_r]$ – пары произведений токов в обмотках статора и ротора;

$u_{s\alpha}, u_{r\alpha}, u_{s\beta}, u_{r\beta}$, $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}$ – напряжения и токи в обмотках статора и ротора по осям α и β;

$R_{s\alpha}, R_{r\alpha}, R_{s\beta}, R_{r\beta}$, $L_{s\alpha}, L_{r\alpha}, L_{s\beta}, L_{r\beta}$ – активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора по осям α и β;

M_c – момент сопротивления;

J – момент инерции АД;

$\omega_к$ – угловые скорости вращения осей;

tz_2 – зубцовое деление ротора;

bn – ширина стержня ротора;
ΔZ – дополнительное сопротивление стержня;
I_s – результирующий вектор тока статора;
C_1, C_2, C_3, C_4 – коэффициенты, определяемые из граничных условий;
i_A, i_B, i_C – мгновенные значения токов фаз статора;
f_1 – частота сети;
f_b – частота боковых гармонических;
$x(t)$ – периодическая функция;
t – текущее время;
T – длительность периода функции;
a_0, a_v, b_v – коэффициенты ряда Фурье;
v, ω – номер и угловая скорость гармонической;
N, n – число выборок и номер выборки;
$F(j\omega)$ – спектральная характеристика функции;
R_i – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора;
$u_A, u_B, u_C,$ u_a, u_b, u_c – мгновенные значения напряжения фаз статора и ротора;
i_a, i_b, i_c – мгновенные значения токов в фазах обмотки ротора;
ψ_i – результирующие потокосцепления фаз;
$L_A, L_B, L_C,$ L_a, L_b, L_c – собственные индуктивности обмоток фаз статора и ротора;
$L_{AB}, L_{BC}, L_{CA},$ L_{ab}, L_{bc}, L_{ca} – взаимные индуктивности обмоток фаз статора и ротора;
L_m – максимальная приведенная взаимная индуктивность между фазами статора и ротора;
γ – электрический угол между осями фаз статора и ротора;
u_{AB}, u_{BC} – междуфазные напряжения;
$\psi_{AB}, \psi_{BC}, \psi_{ab}, \psi_{bc}$ – междуфазные потокосцепления;
i_1, i_2, i_3, i_4 – контурные токи;
$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ – потокосцепления контуров;
$L_{11}, L_{22}, L_{33}, L_{44}$ – собственные индуктивности контуров;
$L_{12}, L_{13}, L_{14},$ L_{23}, L_{24}, L_{34} – взаимные индуктивности контуров;
i_{ni}, i_{ai} – периодическая и апериодическая составляющие

пускового тока;

$g, g+1, \Delta t$ – интервалы времени и их длительность;

$X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{23}, X_{24}, X_{34}, X_{11}, X_{22}, X_{33}, X_{44}$ – индуктивные сопротивления контуров;

K_R, K_{X2} (K_{X1}) – коэффициенты изменения общего активного и реактивного сопротивления фазы ротора (статора) под влиянием эффекта вытеснения тока и от насыщения;

L_1 и $L_2^{'}$ – индуктивность обмотки статора и приведенная индуктивность обмотки ротора;

I_{cn}, I_{kn} – токи в n–м элементе стержня и участка кольца;

E_{cn}, E_{kn} – ЭДС в стержнях и участках кольца;

R_a, R_b, R_c – собственные активные сопротивления фаз ротора

R_a^*, R_b^*, R_c^* до и после аварии;

$L_a^*, L_{ab}^*, L_{ac}^*$ – собственные и взаимные индуктивности фазы *а*

$L_{aA}^*, L_{aB}^*, L_{aC}^*$ ротора до и после аварии;

L_a, L_{ab}, L_{ac}

L_{aA}, L_{aB}, L_{aC}

P_a, P_b, P_c (Q_a, Q_b, Q_c) и P_a^*, P_b^*, P_c^* (Q_a^*, Q_b^*, Q_c^*) – активные (реактивные) мощности фаз *а, в* и *с* неповрежденного ротора и при обрыве стержней;

k_a^r, k_b^r, k_c^r, k_a^x, k_b^x, k_c^x – коэффициенты пересчета активных и индуктивных сопротивлений фаз ротора до и после повреждения стержней;

$Z_{экв}$ – эквивалентное сопротивление обмотки ротора;

I_{can}, $I_{cвn}$, I_{ccn}, I_{kan}, $I_{kвn}$, I_{kcn} – токи в *n*–м элементе стержня и участка кольца фаз *а, в* и *с* ротора;

E_{1d}, E_{2d} ... E_{nd} – добавочные ЭДС поврежденных стержней;

I_{c1d}, I_{c2d} ... I_{cnd} – дополнительные токи поврежденных стержней;

$I_д$ – добавочный ток;

B_{z1}, B_{z2}, B_{z2y} – индукция магнитного поля лобового рассеяния обмотки статора, ротора и тока поврежденного

	элемента;
E_{n1}, E_{n2}, E_{n2}	– ЭДС от токов статора, ротора и поврежденного элемента;
$E_{n2\,д}, E^{*}_{n2\,д}$	– дополнительные гармонические ЭДС;
S_n	– площадь ТИП;
$E_{n2\,дц}, E_{n2\,дп}$	– экспериментальное значение дополнительной гармонической ЭДС при целом и поврежденном роторе
$K_{u1}, K_{u2}, K_{u3}, K_{u4}, K_{u3ср}$	– критерии исправности и коэффициент срабатывания;
$E_{n2\,дл}, E_{n2\,дп}$	– левая и правая дополнительные гармонические ЭДС;
$U_{нг}$	– напряжение с датчиков скольжения и магнитного поля;
$Z_{нг}$	– сопротивление нагрузки;
$t_{дс}, t_{дмп}$	– время снятия сигнала с датчиков скольжения и магнитного поля;
t_1, t_2	– время периода питающей сети и длительность импульсов геркона;
$t_{изм}, n_{изм}$	– длительность и число импульсов;
Δs	– погрешность измерения скольжения;
n_1, n_2	– число оборотов поля статора и ротора;
$t_{äï}, _{min}$	– минимальное время диагностирования;
$s_n, \delta s$	– номинальное скольжение ротора и погрешность его определения;
$k_{отс}$	– коэффициент отстройки;
t_{en1}, t_{ei2}	– время снятия сигналов магнитного поля;
$E_{тип1}, E_{тип2}$	– ЭДС двух индукционных датчиков;
$\Delta f_b, \Delta f$	– разность частот в зоне перемещения и шаг разложения;
I_{x1}, I_{x2}	– тангенциальная составляющая токов пары симметричных проводников статора и ротора;
$B_{y(i.j)}, B_{z(i.j)}$	– радиальная и аксиальная составляющие индукции магнитного поля i, j–го отражения;
y_i, z_j	– координаты i, j–го отражения проводника по осям Y и Z;
$K_y, K_z,$	– коэффициенты коррекции для токов крайних отражений;
B_y, B_z	– радиальная и аксиальная индукция магнитного

поля;

μ_e	– магнитная проницаемость ферромагнитных элементов;
$I_{s(i,j)}$	– величина тока i, j -го отражения;
L, T и H	– размеры призматического канала;
$I_{1вит}$	– ток одного витка секции статора;
β	– коэффициент укорочения обмотки статора;
$B_{y1лоб}, B_{z1лоб}$	– радиальная и аксиальная составляющие индукции магнитного поля отогнутой лобовой части витка секции;
$B_{y1}, B_{z1}, B_{y2}, B_{z2}$	– радиальная и аксиальная составляющие магнитного поля лобового рассеяния обмоток статора и ротора;
l_{z2}, l_{x2k}, $x_{o2k}, y_{o2k}, z_{o2k}$	– размеры и место расположения K -й пары элементов обмотки ротора;
B_1^n и B_2^n	– нормальные составляющие магнитных потоков;
Φ_z' и Φ_y'	– аксиальная и радиальная составляющие магнитных потоков на поверхности щита;
R_{ij}, R_{st}	– размеры воздушного промежутка и расстояние между элементами;
B_y, Φ_y	– индукция и поток на поверхности щита;
$k_э$	– коэффициент экранирования;
$I_{фк}, \Phi_{dd}$	– токи Фуко и создаваемый ими поток;
$E_{фк}, Z_{фк}, R_{фк}, X_{фк}$	– ЭДС и сопротивления демпфирующего контура;
E_n, Z_n, R_n, X_n	– ЭДС и сопротивления ТИП;
I_n, U_n, U_{nk}	– ток в катушке ТИП, напряжение на ее выводах и на выходе щупа;
$Z_{вх}$	– входное сопротивление элементов щупа;
T_l, ε_T	– период основной гармонической и погрешность ее определения;

В монографии использованы традиционные для электротехнической литературы единицы измерения: *А, В, Ом, Гн, Гц, Вт, м, мм, мм², об/мин.*

Приложение Б
(справочное)

Результаты экспериментальных исследований

Таблица Б.1 – Амплитуды дополнительных гармонических асинхронного двигателя АОЛ2-11-4

Параметры АД	**Состояние обмотки ротора АД**		**Отношение параметров**
	ротор цел	**ротор поврежден**	
Ток фазы, А	1,45	1,535	1,06
Скольжение, о.е.	0,0592	0,071	1,2
Амплитуда ЭДС в мВ с частотами			
$f_1 = 50 Гц$	1343	1334	0,99
$\frac{f_1}{p}[(1 \pm 2(1ps)]$	4/2	2/1,5	2/0,75
$\frac{f_1}{p}[(1 \pm 2(2ps)]$	2/2	2/12	1/6
$\frac{f_1}{p}[(1 \pm 2(3ps)]$	5/2	8/8,5	1,6/4,25
$\frac{f_1}{p}[(1 - s) \pm ps)]$	40/8,65	33/31	0,825/3,7
$\frac{f_1}{p}[(1 - s) \pm 3ps)]$	2/2	4/6	2/3
$\frac{f_1}{p}[(1 - s) \pm 5ps)]$	3/2	17/1,5	5,7/0,75

Таблица Б.2 – Изменение амплитуды дополнительных гармонических асинхронного двигателя АОЛ2-11-4 в зависимости от скольжения

Параметры АД	Состояние обмотки ротора АД			
	ротор цел			
Ток фазы, А	1,0	1,35	1,45	1,7
Скольжение s, о.е.	0,01	0,051	0,059	0,087
$\frac{f_1}{p}[(1-s)-ps]$	2,0	2,5	8,8	5,2
$\frac{f_1}{p}[(1-s)+ps]$	74	46	43	29,5
$\frac{f_1}{p}[(1-s)-3ps]$	0,5	0,6	1,2	0,8
$\frac{f_1}{p}[(1-s)+3ps]$	1,5	2,4	2,8	3
	ротор поврежден			
Ток фазы, А	1,07	1,5	1,535	1,815
Скольжение s, о.е.	0,017	0,065	0,067	0,97
$\frac{f_1}{p}[(1-s)-ps]$	16	34,5	32	31
$\frac{f_1}{p}[(1-s)+ps]$	40	30,5	33,5	26
$\frac{f_1}{p}[(1-s)-3ps]$	1,5	1,5	0,8	1
$\frac{f_1}{p}[(1-s)+3ps]$	3,1	1,3	1,6	15

Таблица Б.3 – Амплитуды дополнительных гармонических 4АМ100L6У3

Параметры АД	Состояние обмотки ротора АД		Отношение параметров
	ротор цел	ротор поврежден	
Ток фазы, А	5,32	5,4	1,01
Скольжение,о.е.	0,017	0,019	1,11
Амплитуда ЭДС в мВ с частотами			
$f_1 = 50 Гц$	290	228,4	0,79
$\frac{f_1}{p}[(1 \pm (2ps)]$	0,5/0,4	0,5/0,3	1/0,75
$\frac{f_1}{p}[(1 \pm 2(2ps)]$	0,4/0,3	0,3/0,3	0,75/1
$\frac{f_1}{p}[(1 \pm 3(2ps)]$	0,4/0,3	1,5/0,2	3,75/0,67
$\frac{f_1}{p}[(1-s) \pm ps)]$	2,1/3,2	11/9	5,23/2,9
$\frac{f_1}{p}[(1-s) \pm 3ps)]$	0,75/0,3	1/1	1,33/3,33
$\frac{f_1}{p}[(1-s) \pm 5ps)]$	0,5/0,2	0,8/0,2	1,6/1
$\frac{2f_1}{p}[(1 \pm (2ps)]$	0,8/0,75	0,2/0,2	0,25/0,26
$\frac{2f_1}{p}[(1 \pm 2(2ps)]$	0,9/0,5	0,5/0,1	0,55/0,2
$\frac{2f_1}{p}[(1 \pm 3(2ps)]$	1,1/0,2	0,5/0,2	0,45/1
$\frac{2f_1}{p}[(1-s) \pm ps)]$	1/0,3	11,5/3,2	11,5/10,6
$\frac{2f_1}{p}[(1-s) \pm 3ps)]$	0,9/0,4	0,6/1,5	0,67/3,75
$\frac{2f_1}{p}[(1-s) \pm 5ps)]$	0,3/1	0,5/0,25	1,67/0,25

Таблица Б.4 – Изменение амплитуды дополнительных гармонических 4АМ100L6У3 в первой зоне в зависимости от скольжения

Параметры АД	Состояние обмотки ротора АД					
	ротор цел			ротор поврежден		
Ток фазы, А	3,15	3,3	5,32	3,15	3,37	5,4
Скольжение, s	0,01	0,013	0,0175	0,01	0,0135	0,019
$\frac{f_1}{p}[(1-s)-ps]$	3,4	2,55	3,3	7,3	8,4	9,2
$\frac{f_1}{p}[(1-s)+ps]$	5,7	4,4	2,2	9,1	9,8	10,7

Приложение В
(справочное)

Исходные данные для расчета магнитного поля

Таблица В.1 –Линейные размеры и параметры АД

Элементы торцевой зоны и их обозначение	Тип двигателя	
	АОЛ2-11-4	4АМ100L6У3
	Величина параметра	
H – высота призматического канала, м	0,061	0,0655
T - ширина призматического канала, м	0,061	0,063
h_{11} - высота начала отгиба секции, м	0,038	0,047
h_{12} - высота конца отгиба секции, м	0,04	0,05
t_{11} - расст. до начала отгиба секции, м	0,022	0,024
t_{12} - длина вылета обмотки статора, м	0,037	0,034
y - координата установки ТИП, м	0,04	0,036
z - координата установки ТИП, м	0,051	0,054
τ -полюсное деление, м	0,063	0,059
β - коэффициент укорочения обмотки статора	1	1
$(h_{21}+h_{22})/2$ - высота центра кольца ротора, м	0,021	0,0285
$(t_{21}+t_{22}/2)$ - расстояние до центра кольца ротора, м	0,005	0,005
$I_{1,ном}$ - номинальный ток статора, А	1,71	5,6
I_c - ток стержня ротора, А	99,56	215,6
$I_к$ - ток в кольце ротора, А	134,86	485,3
z_1 - число пазов статора	24	36
z_2 - число пазов ротора	30	33
q_1 - число пазов на полюс и фазу	2	2
t_{z2} - зубцовое деление ротора, м	0,0105	0,01066
w_c - число витков в секции статора	129	44
$2p$ - число пар полюсов	4	6

Содержание

О. А. Андреева

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Монография

Технический редактор З. Ж. Шокубаева
Ответственный секретарь Е. В. Самокиш

Подписано в печать 31.03.2015 г.
Гарнитура Times.
Формат 29,7 х 42 ¼. Бумага офсетная.
Усл.печ. л. 4,81 Тираж 500 экз.
Заказ № 2546

Издательство «КЕРЕКУ»
Павлодарского государственного университета
им. С.Торайгырова
140008, г. Павлодар, ул. Ломова, 64